



## 流体连接件系统的腐蚀

下一代防腐电镀如何实现更高的流体动力产品性能



ENGINEERING YOUR SUCCESS.

# 摘要

流体动力连接器必须在所有环境中都能提供一流的性能。波动的湿度、温度和盐分含量，以及应用中使用的刺激性化学物和介质，都可能成为腐蚀的理想渠道。如果不加以解决，腐蚀会导致产品外观变差，从而不得不进行昂贵的维护，并最终导致整个设备出现故障。派克在全世界的科学家和工程师汇集了他们的冶金专业知识，以提供下一代电镀技术。这促成了长期防腐性能的飞跃，同时保持了与现有产品的兼容性并且不影响组装程序和性能基准。



**Philipp Wagner 博士，  
金属创新中心经理（欧洲）**

Philipp 博士在材料科学、电化学和化学工程领域工作已经超过 15 年。他在派克汉尼汾公司创建了金属创新中心，以开发新的表面技术和防腐创新技术，并将其用于流体动力系统。Philipp 拥有化学理学硕士学位、物理化学博士学位和技术化学特许任教资格。



**Yindong Ge, 博士，  
金属创新中心经理（美国）**

Yindong 是一位材料科学家，在表面工程、腐蚀科学、电化学过程和材料开发方面拥有 15 年的从业经验。他目前是美国俄亥俄州哥伦布的金属创新中心的带头人，负责流体动力部件创新表面保护技术的开发。Yindong 拥有陶瓷工程学学士学位，同时拥有材料科学与工程学硕士和博士学位。

## 腐蚀的代价

腐蚀是金属部件和金属系统的天敌。在适当条件下，加速生锈可以迅速而悄无声息地发生，随之而来的就是大面积损坏。

根据国际腐蚀机构 NACE International（国际腐蚀工程师协会）的统计数据，腐蚀造成的全球损失约达 2.5 万亿美元，相当于全球 GDP 的 3.4%。这个惊人的数字反映了问题的严重性，因为腐蚀对多个领域的设备寿命产生了负面影响。

研究表明，在工业内，在非路面移动机械和制造等行业内，腐蚀在全球造成的损失约达 1.5 万亿美元，其中，单单农业领域就达到 1520 亿美元。NACE International 表示，单个案例的实际损失甚至可能

更高，因为这些数字并未包含个人安全或环境后果。

每种环境下都可能发生腐蚀。流体动力部件腐蚀的严重性在很大程度上取决于最终用户的应用情况和操作环境。例如，在气候控制生产设施内的液压机上使用的液压接头受到的腐蚀影响很小。相反，在室外环境，特别是非路面行驶、卡车运输、农业、采矿和海洋领域的应用，腐蚀可能就会迅速发生。

湿度、温度波动、空中悬浮盐类、化学品和介质等因素都可能导致腐蚀开始发生和加速扩散。如果不加以检查，这种损坏可能

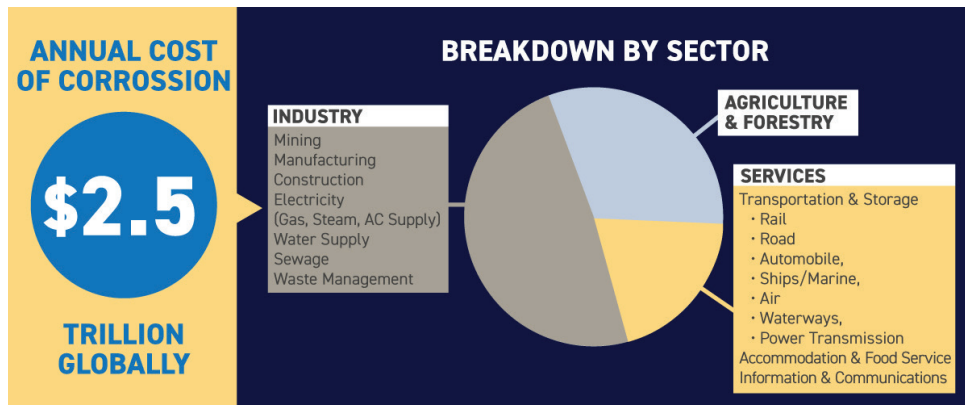


图 1: NACE 报告显示的腐蚀损失

会影响其他更昂贵的部件，从而导致诸多问题，如计划外维护和停机以及昂贵的保修索赔。最终，腐蚀可能引起系统或设备全面失效，从而导致设备的大修或大批更换，严重时还会危及人员安全。



图 2: 即使在正常环境条件下, 非路面设备也会很快发生腐蚀

## 腐蚀是如何形成和扩散的

当金属表面（如钢）上的原子被氧化，就会发生一种电化学反应 - 腐蚀，从而损坏整个表面。

很多金属很容易被氧化：在空气或水中，它们的电子往往会流失到氧气（和其他物质）。当氧气被还原（获得电子）时，它会与金属形成氧化物，从而发生腐蚀。在某些环境下，这个过程会在很短的时间内开始发生。

最常见的腐蚀类型是全面腐蚀。在这种情况下，根据 **NACE International 基本腐蚀过程手册**，腐蚀会或多或少均匀地在暴露表面上扩散，没有明显的局部

化，导致片材和板材均匀变薄，管线和管道的一侧或另一侧（或两侧）普遍变薄。

这种类型的全面腐蚀的特点是表面粗糙，并且经常（但并非总是）发生颜色变化。侵蚀机制通常是发生在材料表面的电化学反应。金属表面小型区域之间的成分或取向差异会产生阳极和阴极，从而促进腐蚀过程的发生。

如图 3 所示，在腐蚀电池中，电子和离子流经发生阳极反应的

金属路径，到达允许发生阴极反应的位置。这种反应一旦开始就很难停止，腐蚀会迅速蔓延，例如，从硬管接头/过渡接头扩散到其他更昂贵的关键部件。

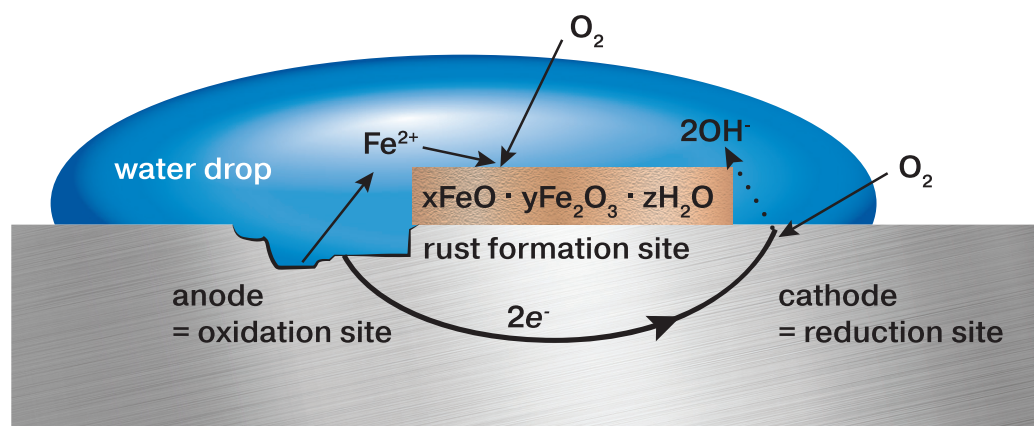


图 3: 钢腐蚀过程中电化学反应的图解

# 镀锌的应用

防止腐蚀的常见做法包括选择更昂贵的材料（如不锈钢）或对关键部件进行电镀处理。对于现代钢制流体动力连接器，镀锌是行业标准。当与钢结合时，这种涂层提供了一个牺牲层，可以抑制基底金属腐蚀。

但是，镀锌只能延迟却不能避免这一过程。高湿度、腐蚀性试剂、泥泞环境、空气污染或盐分的存在等恶劣条件仍会导致严重腐蚀。



图 4：腐蚀迁移到邻近部件

在此类环境中，锌将开始牺牲自身以保护钢基材，产生白色氧化副产物，通常称为白色腐蚀（或白锈）。保护性锌层会随此牺牲过程被消耗掉，基底金属会暴露出来，很快就可以看见红锈。

一旦某个区域的锌被消耗，邻近区域的锌也将受到影响。

因此，即使部件已经镀锌，腐蚀也会通过从一个部件迁移到另一个部件而加速。因此需要更早对相邻接头和配合部件（例如液压缸、阀门或液压软管总成）进行更规律的维修工作。腐蚀使维护和修理工作变得更加困难，因为配合部件往往一起“生锈”，并且扳紧表面可能已受损。

在为基材提供牺牲性保护的同时，白色腐蚀还表现出一种适得其反的特性。这种牺牲性锌氧化反应会产生大量副产品。因此，它不仅在保护基材时扩散，而且在体积上也会膨胀。这种体积上的膨胀经常引起机械应力，使相邻区域更容易被损坏，从而有效地为基底金属腐蚀提供一条破坏路径。

简而言之，腐蚀会在操作和经济上产生重大后果。因此，改进防腐技术一直是许多行业制造商和原始设备制造商的重中之重，在全球范围内引发了研发活动的狂潮。



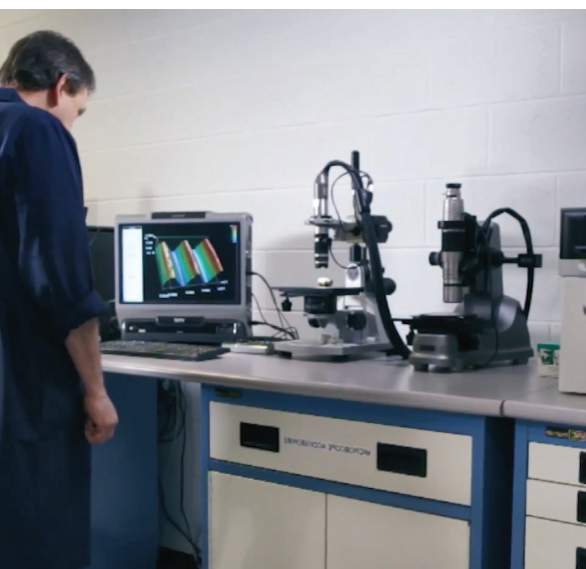
图 5：钢制硬管接头上的锌氧化



图 6：腐蚀可能导致计划外停机并使维护需求增加

# 电镀技术的最新进展

在过去几十年中，已经引入了几种改进的电镀解决方案，部分原因是环保合规要求和腐蚀性能的提高。中性盐雾测试 (SST)，例如 ASTM B117/ISO 9227，是业界普遍接受的用于确定电镀腐蚀保护的评估方法。



例如，派克原先的镀锌解决方案在发生红色腐蚀之前提供了 1000 小时的 SST 耐受性。然而，大多数行业进步仅限于镀锌的渐进式改进。

最近，冶金和表面分析能力得到了发展，并且越来越多的优化合金和纳米技术得到了应用。同时，派克公司经验丰富的科学家和工程师团队一直致力于更深入地了解腐蚀的原因及其是如何扩散的。

大部分工作是在最先进的冶金实验室进行的，这些实验室支持开发替代材料和技术以增强锌电镀。然后可以在模拟客户实际应用的实验室条件下对这些材料进行严格测试。

这项研究已经证明，并非所有的电镀技术都有相同的效果。电镀技术的最新发展，结合其他保护技术和加工方法，可以进一步保护基材免受氧气和湿气的影响。为了更好地理解表面涂层或镀层与下面的基材之间的相互作用，我们进行了大量研究。

我们的最终目标是开发一种具有领先性能的电镀技术，从而使镀层不仅能够承受最恶劣的环境，并且具有外观吸引力，最终为设备制造商和最终用户降低拥有成本。

作为严格的测试和鉴定程序的一部分，派克公司对这些新一代电镀技术测试的严格程度远远超出了传统的中性盐雾测试。具体来说，腐蚀测试在派克实验室以及独立/第三方腐蚀测试设施的各种受控条件下进行。

具体测试包括模拟一系列腐蚀性气氛、盐和其他已知的腐蚀性化学品等条件，包括暴露于刺激性强的农业肥料。参见方框 1。

## 1 盐雾和循环腐蚀测试 (CCT) 程序

盐雾试验 (SST) 为验证金属和表面涂层的耐腐蚀性提供了标准化方法。在这类测试中，样品会受到高度腐蚀侵蚀。

盐雾测试已经使用了几十年，最广泛使用的标准是 ASTM B117 或 ISO 9227。这种方法会在密封的环境试验箱内喷洒氯化钠溶液，以产生侵蚀性盐水雾。然后定期检查样品以评估耐腐蚀性。

循环腐蚀测试 (CCT) 最近有所发展，行业内广泛认为其与现场暴露具有更强的相关性。ISO 16701、SAE J2334 和 OEM 特定测试等测试将盐雾暴露与受控条件下湿度、干热和温度变化的交替循环结合起来。此外，一些测试还添加了氯化钙、甚至硫酸等腐蚀剂。可以以不同顺序多次创建、停止和重新创建不同的气候。其目的是模拟腐蚀性环境以及失效，失效可能自然发生但却以加速方式发生。



# ToughShield Plus™ — 新一代镀层

我们对提升性能的追求从未停止。派克的科学家和工程师继续致力于开发防腐蚀技术，以帮助客户提高液压系统的性能并延长其使用寿命，从而节省成本。

派克最近的重点是将现有的锌镍电镀技术 — 该技术在大多数应用中都提供了良好的性能 — 提升到一个新的水平。这是在更好地理解金属结构、性能和加工之间的关系之后实现的 — 所有这些都是受控条件下得到验证的。

从一开始，我们的目标就是开发一种新的锌镍电镀解决方案，该解决方案可实现最高的耐腐蚀性能水平，同时不影响如组装程

序、工作压力和性能等其他参数，也不影响与现有镀锌产品的相容性。

我们是从一种电镀技术（目前正在申请专利）的开发入手的，这种技术将保护性面漆与铬酸盐转化层结合起来。虽然具体细节受知识产权保护，但派克全球的化学家、冶金学家和工程师团队已部署了最新的表面分析和光谱技术，以更深入了解不同材料之间的复杂相互作用。该 IP 包括开发能以高度优化的方式实现镀层结构化的工艺。凭借先进的结构，可以在镀层中构建额外的功能，从而实现卓越的性能。结果：ToughShield Plus 是市面上

“派克的科学家和工程师继续致力于开发防腐蚀技术，以帮助客户提高液压系统的性能并延长其使用寿命，从而节省成本。”

第一个供流体动力行业使用的标准电镀系统，可在 SST 中提供高达 3000 小时的抗红色腐蚀能力。

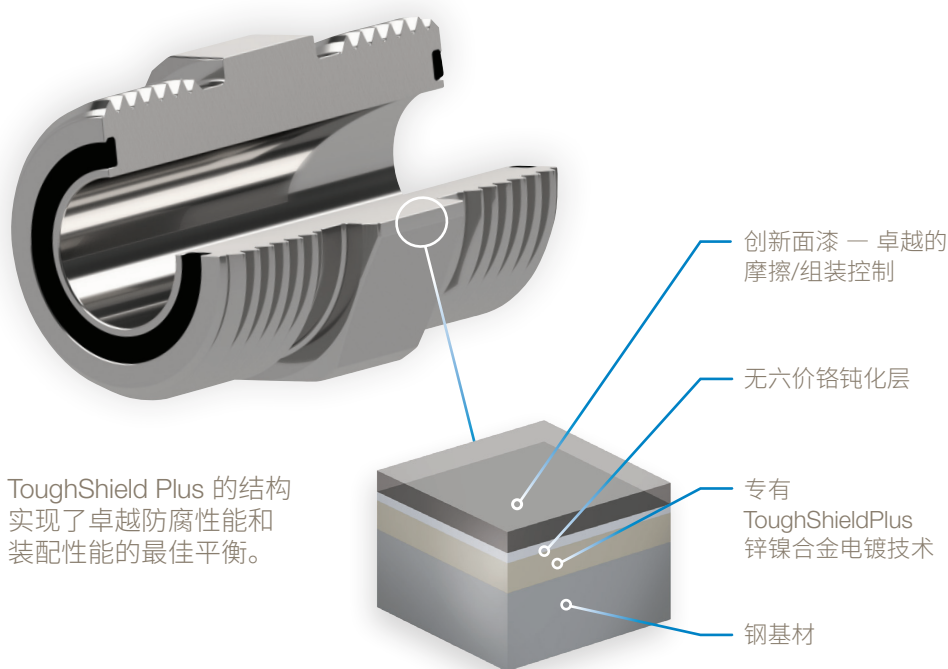
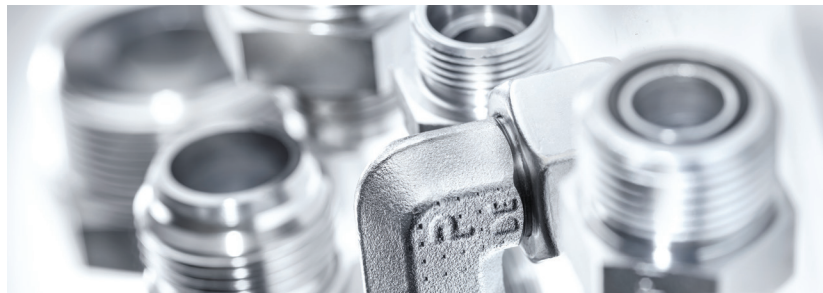


图 7: ToughShield Plus 锌镍镀层的构成



图 8: 派克最先进的金属实验室

# 耐腐蚀性以外的属性



派克的目标是提高钢制流体连接器的耐腐蚀性，同时保持其他属性不变。在表面技术更为广泛和相互关联的过程中，耐腐蚀性只是几个属性之一，而这个过程通常有非常明确的因果关系。

例如，如果保护层具有非常高的耐腐蚀性，但摩擦/装配性能或增强、或减弱亦或不一致，那么该保护层将无法满足不同明确的组装程序和产品性能的行业需求。

从历史上看，流体动力连接器锌镍镀层的一个缺点是其对装配性能的影响。锌镍和锌具有不同的物理属性。由于晶体结构不同，锌镍镀层更为粗糙，因此摩擦系数更高。

因此，这意味着需要更高的装配扭矩或转数才能提供适当的连接负载，从而实现安全无泄漏的连接。业内早期尝试通过使用低摩擦面漆来减轻这一缺点，但又导致性能非常不一致。

因此，控制装配特性一致并优化摩擦系数是派克开发 ToughShield Plus 时的重中之重。

我们的开发结果是获得了锌镍防腐表面，这种表面能在不改变装配程序或装配性能的情况下极大提高防腐性能。此外，该结果还可以完全“向后兼容”现有镀锌部件，使最终用户可以根据需要安心地继续使用和锌以及 ToughShield Plus 锌镍流体动力组件。

# 成型性能提高

从历史上看，电镀层在需要电镀后机械变形的部件上表现不佳。例如，流体动力行业对过渡接头和软管使用扣压垫圈和成型备用垫圈。传统上，由于金属变形会影响镀层，导致这些表面更快腐蚀。事实上，行业管理机构（如 SAE 和 ISO）在 SST 鉴定过程中并不重视这些区域的腐蚀，然而它们是已知的腐蚀失效点。这一挑战要求高度重视研究和开发，以为承受电镀后变形的零件提供更高水平的防腐保护。

派克的科学家和工程师使用最先进的设备（如扫描电子显微镜和 X 射线光谱仪）以及电化学分析方法（如阻抗谱）来揭示和研究高度详细的表面特征。这些知识促成了独特的新电镀结构的开发。因此，ToughShield Plus 工艺经过优化，可提供比市售锌镍镀层更高的成型性能，确保即使在电镀后变形的零件上也能表现出相当的性能。进行腐蚀测试是为了确认在防腐方面取得了这一巨大的飞跃。



图 9: 经过 3,000 小时盐雾测试后的 ToughShield Plus (左) 和锌扣压 (右) 旋转过渡接头

# 确保性能一致性

我们在整个 ToughShield Plus 镀层开发过程中都非常注重工艺稳定性和控制。对关键生产变量实施了统计过程控制的原则，并确立了严格的监控程序和控制限值，以确保 ToughShield Plus 在广泛的派克产品系列和全球众多电镀操作中保持一致的性能。从而 ToughShield Plus 电镀系

统的高工艺过程能力已得到证明，可用于大规模生产环境。这种稳定的工艺过程能力在日常操作和同一天的不同零件之间几乎没有变化。这种对一致性的追求也适用于电镀颜色的一致性。

## 环境影响

ToughShield Plus 改进技术解决方案需要对派克的电镀操作进行工艺重新配置。由于在电镀过程中添加了镍，因此需要对生产设施内的废水处理和监控系统进行精心设计的升级，以确保不会对环境产生影响。

ToughShield Plus 符合 REACH、RoHS 和 ELV 环境指令。

与市售的锌镍电镀类似，ToughShield Plus 电镀生产部件中的镍释放量极少，可确保安全处理。我们采用了现代光谱方法来验证根据 DIN EN 1811 测试的结果，确认释放率符合 REACH 环境指令的附录 17。



图 10: 派克投资最先进的电镀技术

## 白雾

锌镍电镀的腐蚀情况与纯锌电镀类似，但又有区别。两者都是牺牲性的，腐蚀的第一个迹象呈现为变为白色。然而，锌镍腐蚀产物的最初形式是一种非大量的“白雾”，通常被误解为白锈。参见方框 2。

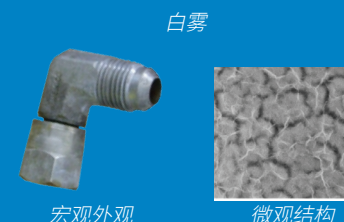
## 2 白锈与白雾

有两种截然不同的白锈腐蚀 — 大量白锈和白雾。

大量白锈，通常在纯锌或锌铁表面呈现为粉末状沉积物。它主要出现在含水量高和腐蚀性化学物质的环境中，指示堆积沉积物下方有局部快速侵蚀。干燥或潮湿时可见大量白锈，并呈现凸起纹理。由于其多孔结构，通常很快就会出现基底金属腐蚀。



相反，在锌镍合金表面腐蚀测试期间，白雾通常是第一个可观察到的表面变化。与白锈相比，它是一种薄、致密、非大量的腐蚀类型。白雾可以在盐雾测试和循环腐蚀测试过程中快速形成，并在较长时间内基本保持不变。尽管外观如上，但白雾在锌镍电镀零件上形成了一层保护屏障，实际上减缓了腐蚀进程。白雾在干净黑色表面上形成，潮湿时不易看到。



宏观外观

微观结构



# 面向更好未来的工程设计

腐蚀不仅不美观、不方便，而且会极大增加运营成本和原始设备制造商的保修预算。全部成本不仅包括更换接头或更昂贵相邻组件的费用，还包括设备停机造成的损失。当贵重设备未得到充分利用，并且熟练的操作员无事可做时，损失就会增加。停机会导致收入减少、声誉受损和客户流失。

派克了解这些方面的担忧，尤其是（但不限于）非路面移动设备和运输设备，其恶劣的操作环境已然成为一种常态。

ToughShield Plus 的开发代表了派克致力于确保客户系统的性能可以超出预期。内部材料科学专业知识、持续研发以及高级测试能力方面的投资对这种专注精神提供了支持。

这促使我们致力于在这些高度以腐蚀为中心的领域内与客户合作，以优化流体输送产品的性能，同时实现创新和工程设计突破，从而创造更美好的未来。



## ToughShield™ Plus

© 2021 派克汉尼汾公司

腐蚀白皮书 2021 年 10 月



**Parker Hannifin Manufacturing Germany  
GmbH & Co. KG**  
**High Pressure Connectors Division Europe**  
Am Metallwerk 9 - 33659 Bielefeld  
德国  
电话 +49 (0) 521-4048-0

[www.toughshield.com](http://www.toughshield.com)

## 3 有效腐蚀管理系统的重要性

NACE International 估计腐蚀带来的损失达 2.5 万亿美元，但该机构认为，如果在全球范围内实施最佳实践腐蚀控制政策，则每年可减少 15% 至 35% 的损失。

在这一领域实现性能提高的关键是实施有效的腐蚀管理系统。这种方法包括创建一套存档的流程和程序，公司需要这些流程和程序来规划、执行、管理和持续评估现有和未来设备面临的腐蚀威胁。

NACE International 表示，管理腐蚀威胁需要考虑腐蚀事件的可能性和后果。这一过程包括根据与安全、环境或设备完整性相关的潜在或实际财务损失来分析腐蚀的结果或影响。

在考虑收入损失、维修成本和清理成本等因素时，该值通常是可量化的。腐蚀影响的其他关键方面包括设备恶化到不再适合预期用途的阶段，从而导致未来产量损失。

**派克汉尼汾公司**  
**Tube Fittings Division**  
3885 Gateway Blvd.  
Columbus, OH 43228  
美国  
电话: 614-279-7070