

耐磨耐蚀涂膜 材料与技術

石淼森 编著



化学工业出版社

耐磨耐蚀涂膜材料与技术

石森森 编著

化学工业出版社

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

耐磨耐蚀涂膜材料与技术/石森森编著. —北京: 化学工业出版社, 2002.12

ISBN 7-5025-4173-X

I. 耐… II. 石… III. 耐磨材料-耐蚀材料-隔膜材料-技术 IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 066971 号

耐磨耐蚀涂膜材料与技术

石森森 编著

责任编辑: 王秀鸾

责任校对: 凌亚男

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 15 字数 408 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4173-X/TQ·1638

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

磨损和腐蚀是十分普遍的物理现象。被动的磨损和腐蚀会使材料的功能逐渐丧失，以至于最后失去使用价值，造成巨大的经济损失。研究磨损和腐蚀的规律，采取相应的措施，挽回造成的经济损失，一直是人们孜孜不倦的奋斗目标，并取得了许多令人兴奋的成就。

许多情况下，磨损和腐蚀现象在功能材料表面是同时发生的。而且，相互间的促进加速了材料的破坏。尤其在恶劣环境条件下更甚。采取不同的方法在材料表面涂敷一层很薄的膜，可以起到耐磨和耐蚀作用。当然，在某些条件下，磨损是造成材料破坏的主要因素，腐蚀则是起促进作用；而在另一些条件下，腐蚀是造成材料破坏的主要因素，磨损则是起促进作用。因此，在设计和制备涂膜时，有以解决腐蚀为主磨损为辅的耐蚀耐磨涂膜，或以解决磨损为主腐蚀为辅的耐磨耐蚀涂膜。

耐磨耐蚀涂膜的种类繁多，作用机理多种多样，制备方法千变万化，使用的环境及其效果也因人而异。本书在总结磨损和腐蚀一般规律的基础上，寻找出利用涂膜来解决磨损和腐蚀的途径。本书特点是实用性强。

参加本书工作的还有史玲娣、石俊伟、石俊毅等人，在此表示谢意。由于耐磨耐蚀涂膜的内涵十分丰富，涉及许多学科和技术，限于作者学术水平和实践经验，对本书存在的谬误与不当之处，敬请读者不吝指正。作者向在本书中引用的著作及论文的所有作者表示衷心感谢，感谢他们所付出的辛勤劳动。

编著者

2002 年 5 月

内 容 提 要

本书介绍了经过各种物理和化学作用，材料表面会产生磨损和腐蚀，其效果是极其有害的。磨损和腐蚀是有其内在联系的。尽管耐磨涂膜和耐蚀涂膜有其各自的特点，但它们之间具备相应的兼容性。如耐磨涂膜既具备耐磨效果，也同时具备耐蚀效果；耐蚀涂膜既具备耐蚀效果，也同时具备耐磨效果，有时甚至不分主次。本书列举了大量耐磨耐蚀涂膜的材料组成、性能特点、制备工艺及其效果。本书的特点为实用性强。可供从事工程设计、材料保护和环保工作的工程技术人员和有关院校师生参阅。

目 录

第一章 概述	1
第一节 磨损和抗磨	1
一、摩擦和磨损	1
二、腐蚀磨损	6
三、耐磨涂膜	10
第二节 腐蚀和抗蚀	12
一、腐蚀现象	13
二、腐蚀类型	20
三、腐蚀的本质	24
四、耐蚀涂膜	26
第三节 耐磨耐蚀涂膜	31
一、磨损与腐蚀的内在联系	31
二、耐磨耐蚀涂膜	33
三、涂膜的作用	38
第四节 涂膜的组成和分类	40
一、涂料的组成	40
二、涂膜的分类	41
第五节 涂膜在国民经济中的作用	42
一、磨损和腐蚀的危害	42
二、耐磨耐蚀涂膜的研究成效	43
三、工程界对涂膜的要求	49
四、21 世纪涂料技术的发展	51
第二章 涂膜性能	59
第一节 涂膜的综合性能	59
一、涂膜的综合性能	59
二、涂膜的重要性能	60
三、涂膜综合性能的评价	65

第二节 粘着性	70
一、软质涂膜的粘着强度	70
二、硬质涂膜的粘着强度	80
第三节 耐磨性	89
一、涂膜的耐磨性	89
二、高分子聚合物的磨粒磨损	95
三、高分子聚合物的微动磨损	97
四、对摩体系的耐磨性	100
第四节 耐蚀性	108
一、大气腐蚀性分类	109
二、耐磨填料的腐蚀性	110
三、涂膜的耐蚀性试验	112
四、涂膜对环境的适应性	114
第五节 耐久性	117
一、涂膜的耐久性	117
二、涂膜户外耐久性试验	121
三、评价耐久性的物理检验法	124
第三章 涂膜填料	130
第一节 涂膜填料	130
一、填料分类	130
二、填料的作用	132
三、纳米填料在涂料中的应用研究	136
四、填料的分散	138
第二节 防护装饰填料	142
一、装饰填料	142
二、防锈填料	147
三、体质填料	153
第三节 固体润滑填料	156
一、固体润滑填料	156
二、自润滑填料	160
三、耐磨填料	161
第四章 粘结涂膜	165
第一节 耐磨涂膜	165

一、耐磨涂膜的分类	165
二、有机粘结耐磨涂膜	168
三、无机粘结耐磨涂膜	173
四、耐磨涂膜应用举例	176
第二节 耐蚀涂膜	184
一、常用耐蚀涂料	185
二、常用防锈涂料	199
三、高固体分涂料	203
四、水性涂料	211
五、电泳涂料	216
六、粉末涂料	218
七、溶胶-凝胶陶瓷涂料	226
八、涂料的选择	230
第三节 工程界使用的耐蚀涂料	233
一、钢结构工程耐蚀涂料	233
二、铁路机车车辆耐蚀涂料	236
三、船舶用海洋涂料	245
四、天然气地下管道耐蚀涂料	251
五、桥梁耐蚀涂料配套系统	258
六、汽车耐蚀装饰涂料	259
第五章 涂膜制备	261
第一节 粘结涂膜	261
一、粘结涂膜的制备工艺	261
二、溶剂	262
三、辅助材料	274
四、固化	277
五、粉末涂料涂装工艺	288
第二节 物理制备	294
一、物理气相沉积	295
二、热喷涂	315
三、表面改性技术	340
第三节 化学制备	356
一、电镀	357

二、化学镀	381
三、电刷镀	390
四、化学转化膜	400
五、化学气相沉积	424
第四节 涂膜的性能与制备工艺	433
一、粘结涂膜性能与制备工艺	433
二、物理制备涂膜性能与制备工艺	441
三、化学制备涂膜性能与制备工艺	454
主要参考文献	469

第一章 概 述

磨损和腐蚀是工程界材料功能失效的主要形式。由此造成的资源、能源的浪费和经济损失可用“巨大”来表示。然而，磨损和腐蚀是有规律可循的。在掌握其某些特定规律的基础上研制有针对性的涂膜，在功能材料表面构建一层薄膜，可以起到耐磨和耐蚀作用。耐磨耐蚀涂膜在各个国家的国民经济中都具有举足轻重的作用。

第一节 磨损和抗磨

摩擦是很普通的物理现象。摩擦的效果是材料的磨损。由于对摩擦材料的性质不同，摩擦时的边界条件不同，磨损的机理和效果也不相同。同时，任何一对摩擦副均处于周围各种环境条件下，有些环境是有利的，而有些环境条件对材料的磨损起着助长的作用，产生腐蚀磨损。缓解摩擦和磨损的办法是润滑，在材料表面用涂镀的方法形成一层极薄的涂膜，能够起到减摩耐磨作用，该涂膜称为耐磨涂膜。

一、摩擦和磨损

两个相互接触的物体在外力的作用下发生相对运动（或具有相对运动的趋势）时，在接触表面产生切向运动阻力。这种现象叫摩擦。这种阻力叫做摩擦力。

1. 摩擦现象

一般情况下，相同金属的纯净表面在干摩擦状态滑动时，摩擦阻力很大，并将出现严重的破坏和咬合现象；当软金属在硬金属表面滑动时，将呈现出具有“粘附滑动”特性的间歇运动，软金属将间断地涂抹在硬金属表面的摩擦轨道上；当硬金属在软金属表面滑动时，运动比较平稳，在软金属表面的摩擦轨道上可以看到硬金属擦过的沟槽。

实际工程材料的任何光滑表面都有粗糙度和波纹度。相对运动的接触表面实际上是这些凸峰顶端间的接触，而摩擦力等于相互啮合部分被剪切或挤压变形所需的力与相互接触部分分子引力的合力。在负荷的作用下，表面凸峰的弹-塑性变形一直持续到真实接触面积能够承受负荷时为止。材料的变形、粘着以及由于相对运动将粘着点撕裂时产生的材料转移或剥落给材料所造成的损失就是粘着磨损。当对偶面间存在着磨粒时，磨粒将对材料表面进行犁沟和切削作用，发生磨粒磨损。

在滑动而干摩擦情况下，粘着磨损的磨损率为 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{Pa} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{min})$ 时属于严重磨损。而磨损率为 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{Pa} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{min})$ 时则属于轻微磨损，如氧化磨损。

在对高分子聚合物的摩擦磨损现象进行了研究后发现：它们的磨损行为各具特点。如对聚碳酸酯（PC）、聚甲基丙烯酸（PMMA）和环氧树脂（EP）的微观磨损行为进行考察分析后发现，磨损过程可以明显分为三个阶段：首先形成台阶式隆起状，接着表面发生变形形成突出部分，最后表面被磨损并产生磨屑。PMMA 和 PC 的磨损过程基本相同，而 EP 的磨损的三个阶段是如此的集中，以至于一开始就产生了磨屑。

摩擦中，摩擦系数随对偶材料的材质不同而不同。相同金属或互溶性较大的金属组成的摩擦副，易发生粘着现象，摩擦系数增大。不同金属组成的摩擦副，如果相互间的互溶性小，不易发生粘着现象，摩擦系数一般都比较小。非金属材料的清洁表面一般不存在自然污染膜，因而摩擦系数都比较小。

具有表面氧化膜的摩擦副，如果氧化膜塑性好，剪切强度比基材的低，摩擦则发生在表面膜之间，表面膜首先磨损，金属表面不易发生粘着，摩擦系数较小。

对摩试验的结果发现，立方晶系的金属由于强烈粘附，摩擦系数高，磨损很大。而六方晶系的金属较立方结构的金属有较好的耐磨性能。

摩擦过程中表面层的元素组成与分布的变化，反映了摩擦副表

面间的化学反应和元素转移等现象。对于高聚物-金属摩擦副，这种变化表现为聚合物的分解、游离基的变化及金属聚合物的生成等。对于金属摩擦副则表现为合金元素的扩散、碳化物的溶解、聚集和球化以及石墨的析出等。这些都会影响到表面的摩擦学性能。

例如，钢与 Cu-Sn 合金对摩时，随着 Cu-Sn 合金中形成的转移膜中 Sn 含量的增加，摩擦系数和磨损均上升。而钢与 Cu-Al 合金对摩时的摩擦系数则随 Al 含量的减小而降低，但磨损规律则相反。当 Al 含量为 20% 时，摩擦系数最小，而磨损量却最大。另一个经典例子是石墨对灰铸铁摩擦学性能的影响，石墨在摩擦面上的防护作用是很明显的。

理论表明，表面能可以影响材料的表面流动压力。理论计算可以预料，在粘着和摩擦中，低表面能的材料可能转移到高能的表面上。粘着磨损系数与界面能及两表面能之和的比值有关。摩擦磨损的各向异性是与表面能的各向异性一致的。例如，当 Au 与 Si 接触时会产生粘着，随后的分离会导致 Au 向 Si 的转移，Au 的内聚键遭到破坏。但当 Au 与 Ge 接触时，Ge 向 Au 转移，这是由于 Ge 的内聚能密度比 Au 低的缘故。Fe 的内聚能比 Si 和 Ge 的都高，所以在摩擦时能在 Fe 的表面看到 Si 或 Ge 的磨痕。在聚合物摩擦中，同样观察到了类似于金属的依内聚能顺序转移的现象。如 PTFE 向聚乙烯转移，聚乙烯向聚丙烯转移，而聚丙烯向有机玻璃转移。

通过往复式滑动磨损试验机对几种不同硬度材料与 SiC 磨粒配磨时的滑动磨粒磨损研究发现，在给定的试验条件下，材料的表面硬度是影响耐磨性能的主要因素。而且，材料的耐磨性是硬度的函数。当硬度以 734 Hv 为起点逐渐增大或减小时，耐磨性与硬度之间是两种具有不同斜率的直线关系。例如，当硬度从 734 Hv 增加到 830 Hv 时，材料的耐磨性就可提高近一倍，磨损表面的粗糙度略有增大，此时的磨损机制为微切削。在硬度从 734 Hv 减小到 317 Hv 时，材料的耐磨性约降低 50%，磨损表面的粗糙度却降低得很快，此时的磨损机制以微切削为主，同时伴随着应变疲劳剥落。因此，在许多工程应用中，追求材料表面的高硬度是获得理想

使用寿命的关键。

两个粗糙表面接触时，接触点相互啮合，摩擦力就是所有这些啮合点的切向阻力的总和。在这种情况下，降低表面粗糙度就可以降低摩擦系数。对于干摩擦机理进行解释的经典理论适用于金属间的对磨：在负荷的作用下，摩擦表面真实接触点上接触应力很大，以致产生塑性变形，形成小平面接触，直到接触面积增大到能够承受全部负荷时为止。对于理想的弹-塑性材料，真实接触面积与负荷的关系可用下式表达：

$$F = A \cdot \sigma_s$$

式中 F ——法向负荷；

A ——真实接触面积；

σ_s ——压缩屈服极限。

在这种情况下，金属表面将出现牢固的粘结点。在切向力的作用下，粘结点被剪断，表面随即发生滑移。摩擦的过程就是粘结与滑移交替进行的过程。摩擦力主要表现为剪断金属粘结点所需的剪切力。若硬表面的粗糙凸峰嵌入较软金属的表面，在摩擦时也会增加滑动阻力。因此，摩擦力可以近似地等于剪断金属粘结点时所需的剪切力。

在塑性接触情况下，由于表面粗糙度对真实接触面积的影响不大，因此可以认为摩擦系数不受表面粗糙度的影响。对于弹性和弹-塑性接触的干摩擦，当光洁的表面达到使表面分子吸引力有效地发生作用时，表面粗糙度越小，真实接触面积越大，因而摩擦力也越大。

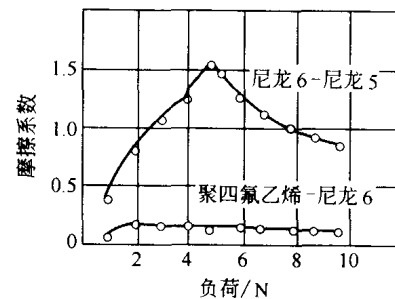


图 1-1 尼龙 6 的摩擦系数与负荷的关系

试验条件：在粘滑试验机上试验；
 $v = 5 \text{ cm/s}$ ；室温

在弹性接触情况下，由于真实接触面积与负荷有关，摩擦系数将随负荷的增加而越过一极大值。当负荷足够大时，真实接触面积变化很小，因而使摩擦趋于

稳定。在弹-塑性接触情况下，材料的摩擦系数也随负荷的增大而越过一极大值，然后随负荷的继续增加而逐渐减小，见图 1-1 和表 1-1。

表 1-1 酚醛塑料的摩擦系数与负荷的关系

试验条件		不同时间(min)的摩擦系数							
转速 /(r/min)	负荷/N	5	10	15	20	25	30	35	40
800	37.3	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03
800	133.5	0.11	0.11	0.07	0.07	0.05	0.05	0.03	0.03
800	222.5	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
800	311.5	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02

摩擦副相互滑动时，产生的温升使材料表面的性能发生变化，从而影响摩擦系数，并随摩擦副的工作条件的不同而变化。例如，高分子聚合物聚酰亚胺、聚乙烯、PTFE 等对钢的摩擦系数随温度的升高而增大。在使用导热性较差的高分子材料时，当表面温度达到一定值时，材料表面将熔化（特别是热塑性高分子材料），所以一般高分子材料只能在一定的范围内使用。超过这个温度范围，材料将失去工作能力，如图 1-2 所示。图中摩擦副材料是尼龙 6 与钢，负荷 196 N，滑动速度为 1 cm/s，用电热方法加温，在高温三号试验机上测得。

2. 摩擦学中的表面膜

清洁表面的裸露分子由于失去了限制，表面结晶点阵原子处于不平衡状态，因而呈现出相当活泼的性质，极容易吸附其他物质的分子或与它起化学作用形成表面膜。除特殊情况外，材料表面通常都有一层污染膜或氧化膜等。这些表面膜可能是气体、液体，也可以是固体。

除惰性气体外，大多数气体能牢固地吸附在洁净的金属或非金属表面上。粘着和摩擦对气体吸附是如此敏感以至于其少量气体都

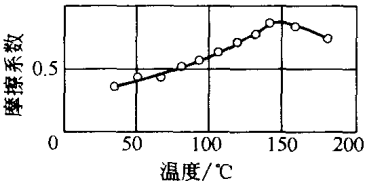


图 1-2 尼龙 6 的摩擦系数随温度变化的情况

可以影响它们。例如，研究铁-氯乙烯的吸附及其摩擦与粘着的影响发现，摩擦使表面机械活化从而使氯乙烯的吸附量增加，吸附最多时摩擦系数最小。氧在摩擦界面上的吸附影响更大，在铁-硅摩擦界面上有氧存在时摩擦系数可降低一半，这说明氧在活化了的表面上形成了保护膜。氧的另一个作用是在摩擦表面上参与和润滑剂的摩擦化学作用。如 MoS_2 经过摩擦之后，Mo 和 S 的化学状态均有变化，Mo 成了 MoO_3 的化学状态，S 有 S^{2-} 、 S^0 、 S^{6+} 三个价态。 S^{6+} 的存在可以用来解释在水蒸气存在时 MoS_2 腐蚀性的原因。在真空条件下石墨几乎丧失润滑性的原因就是缺乏吸附气体。在研究粘结涂膜时还发现，氧气还参与某些粘结剂与基材表面粘结固化时的化学过程。

在对金属表面的氧化物层的摩擦学性能做了研究后发现，自然氧化膜对基材的防护作用取决于氧化膜与基材间的结合强度。在很宽的滑动条件下，氧化物膜可以形成粒子很细的、密实的釉层。这氧化物釉层显著地降低了表面的摩擦和磨损。这对于研究诸如高速内燃机等高温下工作的部件之摩擦磨损很有意义。已经明确氧化膜通过对位错的阻滞作用而影响基材的变形。

在表面工程中大量使用的离子镀、溅射及真空沉积技术已在国内外成功地应用在固体润滑及摩擦磨损的研究中。在不锈钢基材上先涂一层 Cr_3Si_2 ，然后再溅射 MoS_2 膜会使膜的耐磨寿命提高 5 倍。当基材上有氧化物和 MoS_2 的混合区域时提高了膜的粘着性。

对于润滑，摩擦表面上润滑膜的形成，保持润滑膜的较长寿命以及膜的破坏机制等研究显得十分重要。

二、腐蚀磨损

在摩擦过程中，材料同时与周围环境介质发生化学反应或电化学反应，产生物质磨损，这种现象称为腐蚀磨损。农机、矿山、石油化工和水利电力等许多机械设备，工作条件比较恶劣，不仅要受到严重的磨粒磨损或冲蚀磨损，有时还会受到环境介质的强烈腐蚀。化学腐蚀与磨粒磨损的共同作用加剧了设备的失效破坏，造成巨大的经济损失。如拖拉机履带板在水田中的使用寿命仅为在旱田

中的 1/6 左右。据资料介绍，全世界每年约有 45 万吨钢材消耗于选矿设备的腐蚀磨损。矿石粉碎设备的腐蚀磨损是造成选矿生产中大量消耗电力的主要原因。

由于腐蚀磨损过程是一个腐蚀介质和磨粒共同作用而造成材料迁移的复杂过程，因化学腐蚀与磨粒磨损的相互作用，材料的腐蚀磨损行为与其单独化学腐蚀或磨粒磨损时的行为有很大差别。有人发现，腐蚀磨损的速度可达化学腐蚀和磨粒磨损单独作用时的速度叠加的 8~35 倍。有人发现，磨粒的机械作用可使材料的化学腐蚀速度提高 2~4 个数量级。

由于腐蚀介质的性质不同，介质作用于摩擦表面上的状态不同，以及摩擦材料性能的不同，腐蚀磨损出现的状态也不同。可以将腐蚀磨损分为氧化磨损、特殊介质腐蚀磨损、微动腐蚀磨损和气蚀等。

1. 氧化磨损

除了金、铂等少数金属外，大多数金属表面都被氧化膜覆盖着。即使是纯净金属处于空气中，在瞬间即与空气中的氧气起反应生成单分子层氧化膜。若形成的氧化膜是脆性的，它与基材金属的粘结强度小，抗剪切能力就差，则氧化膜极易被磨损。若形成的氧化膜韧性好，它与基材的粘结强度大，抗剪切能力好，则氧化膜起着保护摩擦表面的作用，磨损率就小。如果材料表面的氧化反应速度大于磨损速度，该氧化膜就容易起保护作用；如果材料表面的氧化速度小于磨损速度，则该氧化膜就起不到保护作用。

氧化膜的硬度与基材本身的硬度之间有密切的关系。若氧化膜的硬度高于基材的硬度，即使在很小的负荷作用下，氧化膜也易被破碎而发生氧化磨损。如基材金属铝，其硬度为 HB15，而氧化铝的硬度在 Hv1 800，因此 Al 表面的 Al_2O_3 很易剥落而发生氧化磨损。引起 Al_2O_3 膜破坏的负荷仅需 $2 \times 10^{-3} \text{ N}$ 。若氧化膜的硬度与基材的硬度相近，如铜，其硬度为 HB120，而氧化铜的硬度为 HB150，两者硬度都不高，引起氧化铜膜破坏的负荷为 0.1 N，所以它能经受较小负荷下的磨损。如果负荷较高，基材与氧化膜同时

发生摩擦变形，一旦氧化膜被破坏，便失去其保护作用而发生磨损。

氧化磨损的磨损量与接触负荷，摩擦副的滑动速度，介质中的含氧量以及材料的性能有关。在负荷不变的情况下，磨损类型和磨损量都随滑动速度的变化而变化。现以铁为例予以说明：当滑动速度很小时，摩擦表面被红色的 Fe_2O_3 所覆盖，磨损量较小，属于氧化磨损。当滑动速度增大时，产生的磨屑较大，并呈金属的色泽，摩擦表面粗糙，属于粘着磨损。若滑动速度再增加，摩擦表面即被灰黑色的 Fe_3O_4 粉末所覆盖，又属于氧化磨损。此时的磨损量也较小，当滑动速度继续增高时，又出现粘着磨损，磨损量剧增。

当负荷增大并超过临界值时，磨损量随着负荷的增加而急剧增大，磨损类型由氧化磨损转化为粘着磨损。

理论和实践都能证明：金属在无氧的还原性气氛和惰性气体中，由于其表面没有氧化膜，将产生粘着磨损，而且其磨损量是非常大的。只有在大气环境中，金属表面才能生成牢固结合的氧化膜，发生的氧化磨损才能属于轻微磨损。尽管金属在纯氧气氛中能有充分的条件生成氧化膜，但实验发现该氧化膜与基材金属结合不牢固，因而仍有发生粘着磨损的可能。

2. 特殊介质腐蚀磨损

所谓特殊介质，是指摩擦副所处的环境具有酸性、碱性液体，或处于某种盐液（如海水、各种盐溶液）中。在这种环境下，摩擦副的腐蚀速度和磨损速度将会加快。通常，材料的磨损率随着介质的腐蚀性增强而变大。同时，磨损率随着环境温度的升高而变大。

但是，金属表面可能与特殊介质中的某些物质发生化学作用生成耐磨性较好的保护膜。譬如，将钢铁零件置于碱性溶液中煮沸发黑或处于偏酸性的硫酸盐溶液中发蓝，其表面形成的黑色（或蓝色）薄膜就具有一定的保护作用。摩擦副材料中的合金元素，对腐蚀有较大的影响。如 NiCr 两种金属在特殊介质作用下易形成化学结合力较高、结构致密的钝化膜，从而减轻腐蚀磨损。

3. 微动腐蚀磨损