

高等学校教学参考书

金属腐蚀与防护概论

(修订本)

叶康民 编

人民教育出版社

本书系高等工业学校普通化学课程关于“金属腐蚀”专题的教学参考书。
本书是在1965年第一版(高等教育出版社)的基础上加以修订而成,在内容上作了比较大的增删。

本书由三部分组成。第一部分为金属腐蚀原理(第二章至第五章);第二部分为金属在各种条件下的腐蚀(第六章至第十一章);第三部分为金属腐蚀的防护法(第十二章至第十五章)。

本书可供高等工业学校教师参考和学生课外阅读,也可以供从事金属防腐蚀工作的工人、技术人员参考。

此修订本原稿由北京工业学院普通化学教研组孙震涛、蓝其发同志审阅。

21435/24

高等学校教学参考书
金属腐蚀与防护概论
(修订本)

叶康民 编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 5.75 字数 130,000

1980年6月第1版 1981年2月第1次印刷

印数 00,001—12,000

书号 13012·0477 定价 0.52 元

编者说明

1. 本书是将本人所编《金属腐蚀与防护概论》(高等教育出版社, 1965年第一版)一书加以修订而成, 在内容上作了比较大的增删。

增加的章节有: § 2.5 金属氧化物的性质与氧化; § 3.4 金属的腐蚀电位及其测定法; § 3.5 金属腐蚀电位序; 在 § 4.2 中增加了两个表演实验以说明氧浓差电池; § 4.9 用另一种方式阐述电极面积大小对于腐蚀速度的影响; § 4.13 外加电流的极化曲线; § 4.14 线性极化技术与快速测定腐蚀速度; 第五章电位-pH图; 第六章金属的局部腐蚀; 第七章金属在大气中的腐蚀; 第八章金属在土壤中的腐蚀; 第九章金属在海水中的腐蚀; 第十章金属在熔融盐中的腐蚀; 第十一章在机械因素影响下的金属腐蚀; 将原书的第六章金属的防护方法分为四章; 在第十三章应用缓蚀剂中增加了有机缓蚀剂的一些内容; 在第十四章 § 14.3 阳极保护增加了一点内容; 在第十五章中的 § 15.2 增加了一些关于涂料方面的内容; 最后在 § 15.4 增加了一些关于可剥性塑料的内容。

删去的章节: 鉴于原书的第五章影响金属腐蚀的各种因素在本书中的实用意义不大, 修订时将其删去, 而将其部分内容编入本书的有关章节(如杂散电流的影响一节, 编入土壤腐蚀一章中)。

2. 本书由三部分组成。第一部分(第二章至第五章)为金属腐蚀原理, 着重阐述电化学腐蚀的现象、原因及其机理。第二部分(第六章至第十一章)为金属在各种条件下的腐蚀。第三部分(第十二章至第十五章)为金属腐蚀的防护法。

3. 本书是作为一本高等学校(非腐蚀及防护专业)的教学参

考书来编写的,其目的是介绍有关金属腐蚀及防护的基本知识,只能就金属腐蚀的一般问题作概括性的介绍。由于篇幅的限制,对某些具体的腐蚀问题不能作深入详细的论述。同样的理由,对于耐腐蚀金属材料和腐蚀的试验方法等方面的内容,本书也没有编入。

4. 由于编者水平的限制,本书的内容一定有很多错误的地方,希望提出批评指正。

编 者

1979年9月

目 录

第一章 绪论

§ 1.1	金属腐蚀及防护在国民经济中的意义	1
§ 1.2	金属腐蚀及防护这门科学的任务及其研究内容	2
§ 1.3	金属腐蚀的分类及其破坏形式	3
§ 1.4	腐蚀程度的表示方法	5

第一部分 金属腐蚀原理

第二章 化学腐蚀

§ 2.1	金属表面膜的概念	8
§ 2.2	金属表面膜作为保护层的必要条件	9
§ 2.3	表面膜的形成过程及其成长规律	11
§ 2.4	表面膜的内应力及膜的破坏	15
§ 2.5	金属氧化物的性质与氧化	16
§ 2.6	钢铁的气体腐蚀	19
§ 2.7	防止气体腐蚀的方法	21

第三章 电极电位

§ 3.1	金属电极电位	24
§ 3.2	标准电极电位和金属电动序	26
§ 3.3	平衡电位与非平衡电位	29
§ 3.4	金属的腐蚀电位及其测定法	31
§ 3.5	金属的腐蚀电位序	33
§ 3.6	气体电极、氢电极、氧电极	34
§ 3.7	氧化还原电极	37

第四章 电化学腐蚀理论

§ 4.1	电化学腐蚀的原因	42
§ 4.2	腐蚀电池的类型	45
§ 4.3	电化学腐蚀速度	51

§ 4.4	极化作用	51
§ 4.5	阳极极化	53
§ 4.6	阴极极化	55
§ 4.7	氢去极化的腐蚀	57
§ 4.8	氧去极化的腐蚀	62
§ 4.9	电偶腐蚀中电极面积的大小对于腐蚀速度的影响	64
§ 4.10	腐蚀电池工作的图解分析	65
§ 4.11	腐蚀极化图解的应用	69
§ 4.12	腐蚀的控制因素	71
§ 4.13	外加电流的极化曲线	74
§ 4.14	线性极化技术与快速测定腐蚀速度	76
§ 4.15	金属的钝化	78
§ 4.16	金属钝化理论	80

第五章 电位-pH 图

§ 5.1	什么是电位-pH 图	84
§ 5.2	铁的电位-pH 图及其在防腐蚀中的应用	86
§ 5.3	应用电位-pH 图的局限性	88

第二部分 金属在各种条件下的腐蚀

第六章 金属的局部腐蚀

§ 6.1	小孔腐蚀	91
§ 6.2	缝隙腐蚀	95
§ 6.3	晶间腐蚀	97

第七章 金属在大气中的腐蚀

§ 7.1	大气腐蚀的分类	100
§ 7.2	大气腐蚀进行的过程	101
§ 7.3	影响大气腐蚀性的一些因素	102
§ 7.4	防止大气腐蚀的方法	104

第八章 金属在土壤中的腐蚀

§ 8.1	土壤腐蚀的严重性	106
§ 8.2	土壤的腐蚀性	106

§ 8.3	由杂散电流引起的土壤腐蚀	109
-------	--------------	-----

第九章 金属在海水中的腐蚀

§ 9.1	影响海水腐蚀性的一些因素	112
§ 9.2	海水腐蚀过程的基本特征	114
§ 9.3	耐海水腐蚀的金属材料	115

第十章 金属在熔融盐中的腐蚀

第十一章 在机械因素影响下的金属腐蚀

§ 11.1	应力腐蚀裂开	120
§ 11.2	应力腐蚀的机理	121
§ 11.3	防止金属应力腐蚀的主要措施	123
§ 11.4	氢脆和氢裂	124
§ 11.5	碱脆	125
§ 11.6	腐蚀疲劳	126

第三部分 金属的防护方法

第十二章 正确选用金属材料和合理设计金属结构

§ 12.1	正确选用金属材料	129
§ 12.2	合理设计的重要性	130

第十三章 腐蚀介质的处理——缓蚀剂的应用

§ 13.1	消除或减少介质中的有害成分	133
§ 13.2	应用缓蚀剂	134

第十四章 电化学保护法

§ 14.1	电化学保护的两种方法	144
§ 14.2	阴极保护	144
§ 14.3	阳极保护	153

第十五章 用覆盖层保护

§ 15.1	金属覆盖层	158
§ 15.2	非金属覆盖层	161
§ 15.3	用化学或电化学方法生成覆盖层	166
§ 15.4	暂时性的覆盖层	171

第一章 绪 论

§ 1.1 金属腐蚀及防护在国民经济中的意义

金属表面与周围介质发生化学及电化学反应而遭受破坏，叫做金属腐蚀。从热力学的观点来看，除少数的贵金属^①（如 Au、Pt）外，各种金属都有与周围介质发生作用而转变成离子的倾向，也就是说金属受腐蚀是自然趋势，因此腐蚀现象是普遍存在的。钢铁结构在大气中生锈，海船外壳在海水中的腐蚀，地下金属管道的穿孔，热力发电厂中锅炉的损坏，化工厂中各种金属容器的损坏，轧钢及金属热处理时氧化皮的形成等等，都是金属腐蚀的例子。

金属表面因机械磨损而引起的破坏，通常叫做磨蚀，例如铸铁轴承被磨损即称为磨蚀，而轴承生锈则称为腐蚀。

腐蚀和磨蚀这两种破坏作用，有时会同时发生。例如某些在水中使用的金属结构，在水中受到流沙冲击而发生磨蚀，同时也可能受到腐蚀。

金属腐蚀问题遍及国民经济和国防建设的各个部门，大量的金属构件和装备因腐蚀而报废，据国外统计每年由于腐蚀而报废的金属设备和材料，约相当于金属年产量的 20~40%，全世界每年因腐蚀而损耗的金属达 1 亿吨以上。金属腐蚀直接和间接地造成巨大的经济损失，据有关国家统计，每年由于腐蚀而造成的经济损失，英国为 13.65 亿英镑，占国民经济总产值的 3.5%（1969 年）；美国为 150 亿美元（1972~1973 年度）；日本为 92 亿美元（1974 年）；西德为 350 亿马克。我国因腐蚀造成的经济损失虽没有完整的统

① Au、Pt 等贵金属在一些特殊的介质（例如王水）中也能转变为离子。

计数字,但估计也是非常惊人的。

由于金属设备受腐蚀而引起停工停产,产品质量下降,大量有用物质(例如地下管道输送的油、水、气等)渗漏,环境污染,有时甚至造成火灾、爆炸等重大事故。这些总的损失比起金属本身的价值要大得多。为了防止腐蚀,人们不得不采取一系列措施,而投入的人力物力那就更大了。

为了减轻因金属腐蚀带来的损失,研究腐蚀发生的原因及其防护的方法,对于国民经济的发展,实现我国四个现代化,具有十分重要的意义。

§ 1.2 金属腐蚀及防护这门科学的任务 及其研究内容

恩格斯说:“科学的发生和发展,一开始就是由生产所决定的”^①。金属腐蚀及防护这门科学也不例外,它是随着生产发展的需要,在近几十年逐渐建立和发展起来的。

金属腐蚀是发生在金属表面与介质之间的化学或电化学的多相反应。因此,作为研究金属腐蚀的这门科学分支,它基本上是奠基于金属学与物理化学这两门科学之上的。特别是研究物理化学中多相反应的化学动力学和电化学过程动力学,对于了解腐蚀现象的本质,起着非常重要的作用。

金属腐蚀及防护学的研究对象是金属和合金表面的物理-化学破坏问题,研究的内容包括如下两个方面:

1. 研究金属和周围介质作用时所发生的化学或电化学的现象,确定这些现象的机理及其一般规律。
2. 研究在各种条件下使用的金属结构(机器仪器,建筑物,运

^① 恩格斯:《自然辩证法》,人民出版社,1971年,第162页。

输用具等)的腐蚀防止法。

金属腐蚀及防护这门科学,还是一门很年青的科学,它不仅与金属学和物理化学有关,而且还与冶金学、工程力学、机械工程和生物学等有关部分发生密切的关系,所以它是融合好几门科学的新兴边缘学科。近年来由于生产上的需要,腐蚀科学有了飞速的发展,现在许多国家都组织了专门的机构对金属腐蚀问题大力开展研究并进行国际间的协作和学术交流活动,全世界出版的有关腐蚀和防护方面的专业性刊物,已有几十种。

我国在解放后,随着国民经济的恢复与发展,在党与政府的重视和关怀下,有关单位已经组织了专门研究机构,大力开展腐蚀与防护的研究工作,同时在高等学校设置了这方面的专业,培养了一批从事腐蚀和防护工作的专门人才,取得了不小的成绩。但是由于林彪、“四人帮”的干扰和破坏,我国目前在腐蚀科学的研究方面,与世界先进工业国家相比,仍然有很大的差距,现在国家科委已把腐蚀科学列入“1978~1985 全国科学技术发展规划纲要”作为重点研究项目之一。可以相信,在党的领导下我国的腐蚀与防护科学,也必然和其他科学一样,将会得到更快的发展,为加速实现我国的四个现代化,作出贡献。

§ 1.3 金属腐蚀的分类及其破坏形式

金属腐蚀一般可分为两大类:

1. 化学腐蚀 化学腐蚀是因金属表面与介质发生化学作用而引起的,它的特点是在作用进行中没有电流产生。化学腐蚀可分为如下两类:

1) 气体腐蚀 金属在干燥气体中(表面上没有湿气冷凝)发生的腐蚀,称为气体腐蚀。气体腐蚀一般是指在高温时金属的腐蚀,例如轧钢时生成厚的氧化皮,内燃机活塞的烧坏等。

2) 在非电解质溶液中的腐蚀 这是指金属在不导电的液体中发生的腐蚀,例如金属在有机液体(如酒精、石油等)中的腐蚀。

2. 电化学腐蚀 电化学腐蚀与化学腐蚀不同之处在于前者在进行的过程中有电流产生。按照所接触环境的不同,可以把电化学腐蚀分为如下几类:

1) 大气腐蚀 腐蚀在潮湿的气体(例如空气)中进行。

2) 土壤腐蚀 埋设在地下的金属构筑物(如管道、电缆等)的腐蚀。

3) 在电解质溶液中的腐蚀 这是极其广泛的一类腐蚀,天然水及大部分水溶液对金属结构的腐蚀(例如在海水和酸、碱、盐的水溶液中所发生的腐蚀)都属于这一类。

4) 在熔融盐中的腐蚀 例如在热处理车间,熔盐加热炉中的盐炉电极和所处理的金属发生的腐蚀。

按照腐蚀破坏的形式,可以把腐蚀分为两大类:均匀腐蚀和局部腐蚀。均匀腐蚀是腐蚀作用均匀地发生在整个金属表面上(图 1.1a);局部腐蚀是腐蚀作用仅局限在一定的区域。局部腐蚀又可分为:

1) 斑点腐蚀 腐蚀像斑点一样分布在金属表面上,所占面积较大,但不很深(图 1.1b)。

2) 脓疮腐蚀 金属被腐蚀破坏的情形好像人身上长的脓疮,被损坏的部分较深较大(图 1.1c)。

3) 孔腐蚀(又称点腐蚀) 在金属某些部分被腐蚀成为一些小而深的圆孔,有时甚至发生穿孔(图 1.1d)。

4) 晶间腐蚀 这种腐蚀发生在金属晶体的边缘上。金属遭受晶间腐蚀时,它的晶粒间的结合力显著减小,内部组织变得很松弛,从而机械强度大大降低(图 1.1e)。

5) 穿晶粒腐蚀 破坏沿最大张应力线发生的一种局部腐蚀,

其特征是腐蚀可以贯穿晶粒本体，例如金属在周期地交变载荷下的腐蚀及在一定的张应力下的腐蚀。穿晶粒腐蚀通常又称腐蚀裂开(图 1.1f)。

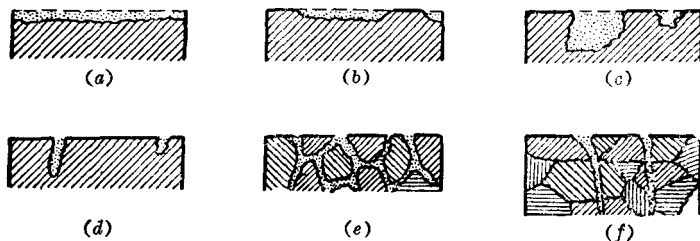


图 1.1 腐蚀破坏的各种形式

- | | |
|--------------|--------------|
| (a) —— 均匀腐蚀； | (c) —— 脓疮腐蚀； |
| (b) —— 斑点腐蚀； | (d) —— 孔腐蚀； |
| (e) —— 晶间腐蚀； | (f) —— 穿晶粒腐蚀 |

6) 选择腐蚀 多元合金中某一组分溶解到腐蚀介质中去，而造成另一组分富集在合金的表面上。黄铜的脱锌，便是选择性腐蚀的例子，此时黄铜的组分之一——锌溶解到介质中去，金属表面上富集着铜而呈红色。

局部腐蚀比均匀腐蚀危害要大得多。例如，一根铁管如果均匀地慢慢腐蚀，则可以使用相当长的时间而并无妨碍，但如果局部腐蚀而烂穿成小孔，则它就要报废。特别是晶间腐蚀对于受应力的器械危害最大：高压锅炉、飞机上侧面薄壁、钢索、机器的轴等，假如发生晶间腐蚀，就可能突然崩裂以致发生严重事故。

§ 1.4 腐蚀程度的表示方法

金属腐蚀的程度通常是用平均腐蚀速度来表示的。评定腐蚀程度的方法很多，这里不一一加以叙述，下面简单介绍两种最常用的方法。

1. 由重量的变化来评定 金属的腐蚀程度可以由样品在腐

蚀前后重量的变化(减少或增加)来评定。如果根据重量的减少来测定,可以用下式来表示其腐蚀速度:

$$k_{\text{重量}}^{-} = \frac{g_0 - g_1}{S_0 t}$$

式中 $k_{\text{重量}}^{-}$ ——腐蚀速度, 克/米²·小时; g_0 ——样品腐蚀前的重量, 克; g_1 ——样品腐蚀后的重量, 克; S_0 ——样品的表面积, 米²; t ——腐蚀的时间, 小时。显然, 此法只能在均匀腐蚀并能很好地清除金属表面的腐蚀产物时, 才能采用。在某种情况下, 如果金属表面的腐蚀产物全部附着在上面, 或者即使脱落下来也能全部把它收集起来时, 则腐蚀速度可以根据样品腐蚀前后的重量增加来测定, 此时可用如下的关系式:

$$k_{\text{重量}}^{+} = \frac{g_2 - g_0}{S_0 t}$$

$k_{\text{重量}}^{+}$ ——腐蚀速度, 克/米²·小时; g_2 ——带有腐蚀产物的样品重量, 克。

2. 由腐蚀深度来评定 上面所述的两种方法是用重量变化来表示腐蚀速度, 都没有考虑金属的比重。当两种比重不同的金属, 其重量的损失相同时, 若两种金属的表面积也相同, 显然, 这两种金属的腐蚀深度就不同, 比重大的金属, 其腐蚀深度自然就浅一些。例如当重量损失等于 1.0 克/米²·小时时, 钢、生铁和铜的样品的腐蚀深度为 1.1 毫米/年, 铝样品则为 3.4 毫米/年。因此, 为了表示腐蚀前后样品尺寸的变化, 用腐蚀深度来评定腐蚀速度更为适当, 通常用毫米/年来表示, 可按下式计算:

$$\Pi = \frac{k_{\text{重量}}^{-}}{d_{\text{金属}}} \times \frac{24 \times 365}{1000} = 8.76 \times \frac{k_{\text{重量}}^{-}}{d_{\text{金属}}}$$

式中 Π ——用腐蚀深度表示的腐蚀速度, 毫米/年; $k_{\text{重量}}^{-}$ ——由重量减少求得的腐蚀速度, 克/米²·小时; $d_{\text{金属}}$ ——金属的密度, 克/厘米³。

表 1 金属耐腐蚀性标准

耐腐蚀性的分类		耐腐蚀性的等级	腐蚀速度, 毫米/年
I	完全耐蚀	1	<0.001
		2	0.001~0.005
II	极耐蚀	3	0.005~0.01
		4	0.01~0.05
III	耐蚀	5	0.05~0.1
		6	0.1~0.5
IV	尚耐蚀	7	0.5~1.0
		8	1.0~5.0
V	稍耐蚀	9	5.0~10.0
		10	>10.0
VI	不耐蚀		

金属和合金的耐腐蚀性通常按照表 1 中列出的十级标准来评定。

应当指出,用上述方法来评定金属的腐蚀程度,只是在均匀腐蚀的情况下结果才是正确的,对于金属的晶间腐蚀和局部腐蚀的腐蚀程度不能采用这种方法来测定。

参 考 书 目

Г. Т. Бахвалов, А. В. Турковская: *Коррозия и защита Металлов*, Металлургиздат, 1959.

Н. Д. 托马晓夫: 金属腐蚀及其保护的理論, 中国工业出版社, 1964。

北京钢铁学院、中南矿冶学院合编: 金属腐蚀与保护, 中国工业出版社, 1962。

第一部分 金属腐蚀原理

第二章 化学腐蚀

§ 2.1 金属表面膜的概念

如果我们把一片银放在盛有 I_2 蒸气的玻璃容器中, 就可以发现银片表面的颜色逐渐改变: 由黄色经浅绿色最后变成红褐色。此后从银片的外观上就看不出有什么明显的变化, 反应似乎已经停止进行。这一现象可以这样解释: 当 Ag 与 I_2 作用时, 在银的表面上生成了一层 AgI 薄膜, 随着这层膜的增厚, 发生不同程度的光的干扰, 于是表现出不同的颜色。当膜的厚度一定时, 颜色也就不再改变。假如所形成的膜很紧密, 它就能把金属 (Ag) 与介质 (I_2) 隔离开来, 阻碍它们相互接触, 因而它们的反应速度大大地减低下来, 甚至于反应停止进行。像这样的一层由腐蚀产物(这里是 AgI)组成的, 能把金属表面遮盖起来从而降低金属腐蚀速度的薄膜, 我们就称之为表面保护膜。

很多金属与空气中的氧作用, 也能在金属表面上形成一层氧化物的薄膜。这一层膜的厚度取决于金属的性质、它的表面状态、氧化温度和介质的组成。金属在空气中常温时形成的膜非常薄, 不致影响金属的光泽。例如在铁和铜上所形成的膜, 其厚度为 $10\sim 30\text{\AA}$ ($\text{\AA}=10^{-8}$ 厘米), 在铝上膜厚约为 50\AA 。

按照膜的厚度, 可以把金属表面膜分为三类:

1. 薄膜, 看不见的 厚度 $< 400\text{\AA}$
2. 中间厚度的膜 厚度 $400\sim 5000\text{\AA}$

(金属表面表现出氧化色)

3. 厚膜, 看得见的 厚度 $> 5000 \text{ \AA}$

化学腐蚀是金属与介质直接起化学作用所引起的, 它的腐蚀产物首先在金属表面上生成, 这就是一般所指的表面膜。表面膜的性质(完整性、可塑性、与金属的附着力等)对于化学腐蚀速度有直接影响。因此研究表面膜的性质及其生长过程和规律以及影响膜性质的其他因素等, 对于了解化学腐蚀的机理有着十分重大的意义。

§ 2.2 金属表面膜作为保护层的必要条件

如上所述, 腐蚀产物薄膜遮盖住金属的表面之后, 即能在一定程度上降低金属与介质的反应速度, 甚至保护金属不遭受进一步腐蚀。但是, 腐蚀产物膜要作为保护层而具有保护作用, 首先它必须是紧密的、完整的。以金属在空气中被氧化为例, 只有当生成的氧化物膜把金属表面全部遮盖住时, 才能保护金属不致进一步被氧化。

氧化膜是否完整, 决定于这样一个必要的条件: 氧化物的体积要大于所消耗的金属的体积。否则, 氧化膜就不够用来盖没整个金属表面, 结果就会成为多孔疏松的膜。

氧化物的体积与金属体积之比, 可以计算出来:

例如, 氧化 1 摩尔金属原子, 则金属体积为:

$$V_{\text{金属}} = \frac{A}{d}$$

A ——金属摩尔质量; d ——金属的比重, 克/厘米³。

此 1 摩尔金属原子所生成的氧化物的体积应为:

$$V_{\text{氧化物}} = \frac{M}{xD}$$

M ——氧化物的摩尔质量; x ——一个分子氧化物中金属原子的个

数; D ——氧化物的比重。

$$\text{两者体积之比: } \frac{V_{\text{氧化物}}}{V_{\text{金属}}} = \frac{Md}{xDA}$$

当 $\frac{Md}{xDA} > 1$ 时, 氧化膜才可能是完整的; $\frac{Md}{xDA} < 1$ 时, 氧化膜不可能是完整的。

表 2.1 列出了计算出的一些金属的 $\frac{Md}{xDA}$ 比值。

从表 2.1 可以看出, 碱金属、碱土金属的 $\frac{Md}{xDA} < 1$, 因而它们生成的氧化物表面膜是不完整的, 所以这些金属强烈地被氧化。

应当指出, $\frac{Md}{xDA} > 1$, 只是说表面膜具有保护性的必要条件, 而不是唯一条件。因为还有其他因素(如膜成长时发生的内应力, 温度的骤变等)也会影响到膜的完整性。

表 2.1 氧化物与原来金属的体积比

金 属	氧化物	$\frac{Md}{xDA}$	金 属	氧化物	$\frac{Md}{xDA}$
K	K ₂ O	0.45	Cd	CdO	1.21
Na	Na ₂ O	0.55	Al	Al ₂ O ₃	1.28
Ca	CaO	0.64	Pb	PbO	1.29
Ba	BaO	0.67	Sn	SnO ₂	1.34
Mg	MgO	0.81	Th	ThO ₂	1.36
			Zn	ZnO	1.57
			Ni	NiO	1.60
			Be	BeO	1.70
			Cu	Cu ₂ O	1.70
			Cr	Cr ₂ O ₃	2.07
			Fe	Fe ₂ O ₃	2.14

如果 $\frac{Md}{xDA} \gg 1$, 而且膜的质地又较脆, 则这种膜很容易破裂, 因而没有保护性能。一般可以粗略地认为, 金属上的表面膜在 $1 <$