

金属腐蚀理论与保护

(二)

北 京 化 工 学 院

一九七九年六月

目 录

第一章 概论

第一节 金属腐蚀的危害及防腐工作的重大意义

第二节 金属腐蚀的定义和分类

第三节 金属防腐的主要途径

第四节 参考文献简介

第二章 金属的电化学腐蚀趋势

第一节 金属与电解质溶液

第二节 电极电位与电化学腐蚀趋势的判断

第三节 金属发生电化学腐蚀的原因

第四节 原电池与电解池

第五节 PH—电位图及其应用

第三章 极化与腐蚀速度

第一节 极化作用与去极化作用

第二节 气体参加的阴极过程

第三节 极化曲线

第四章 金属在化工介质和自然条件下的腐蚀

第一节 金属在化工介质中的腐蚀

第二节 金属在自然条件下的腐蚀

第三节 影响金属腐蚀的因素

第五章 金属腐蚀速度测定

第一节 重量法

第二节 电阻法

第三节 极化曲线法

第四节 线性极化法

第五节 容量法

第六节 电偶法及椭圆术简介

第六章 电化学保护

第一节 阳极保护

第二节 阴极保护

第七章 缓蚀剂

第一节 缓蚀剂的保护机理及分类

第二节 缓蚀剂的生产应用

第三节 我国缓蚀剂的发展概况

第八章 金属复盖层

第一节 金属喷镀和渗镀

第二节 金属的电镀

第六章 电 化 学 保 护

电化学保护是根据金属腐蚀的电化学理论而进行的保护方法，它可分为阳极保护和阴极保护两种，现分述如下。

第一节 阳 极 保 护

阳极保护是一门较新的防腐蚀技术，1958年才在世界上第一次得到应用。到目前为止，也仅仅在工业发达的国家用在有限的几种结构简单的化工设备上。我国在1961年开始研究，1966年对碳酸氢铵生产中的碳化塔应用阳极保护开始探索，1967年成功地将这一新技术用于碳化塔。

碳酸氢铵加压碳化塔，是我国化肥生产中独有的一种化工设备，体积庞大，塔内布满冷却水箱，结构复杂。如某厂（年产合成氨6万吨）加压碳化塔自开工以来腐蚀极为严重，塔内冷却水箱原用大漆防腐二个月就被腐蚀穿漏，用环氧树脂防腐至多使用一年就被腐蚀穿孔，一般每年要换水箱30只，有时竟达90只，常常使生产被迫停工，造成人力物力的极大浪费。因此，碳化塔的腐蚀成为化肥生产中的老大难问题之一。

面对这一严重的腐蚀问题，我国广大工人和工程技术人员在毛主席革命路线指引下，独立自主、自力更生，在缺乏技术资料 and 仪器设备的困难条件下，发扬敢想敢干敢于革命的精神，深入现场调查研究，经过实验室和现场的多次反复试验，终于在碳化塔上实现了阳极保护。被保护设备的面积和结构复杂程度都大大超过了国外，从而解决了化肥生产中的一个严重腐蚀问题，为增产化肥作出了积极贡献。

经过十几年的生产实践证明，碳化塔阳极保护的效果是很显著的，它大大提高了设备使用寿命，有效地扭转了碳铵生产的被动局面。目前，全国约有数十个化肥厂采用了这一新技术，它与其它的新生物一样，正日益得到更多工厂的重视并逐渐完善和发展。

继碳化塔阳极保护成功地应用于生产后，一九七一年，我国某厂三氧化硫发生器（内装 300°C 的发烟硫酸）也开始采用阳极保护，该设备采用阳极保护前腐蚀非常严重，每生产30多吨产品，设备就烂穿报废。采用阳极保护后，设备使用寿命约提高七倍。

下面，以碳铵生产中的碳化塔阳极保护为例，阐述阳极保护的有关理论及生产应用问题。

一、什么叫阳极保护

碳钢制的碳化塔塔体和冷却水箱处于碳化生产液（氨水和饱和碳酸氢铵混合液）中，由于碳钢表面的电化学不均匀性（就是说在 $\angle$ 表面上各个部分，由于种种原因，其电位是不完全相同的），形成了局部电池。电池工作的结果，阳极部分的金属就变成金属离子溶解下来，因而遭受腐蚀，使冷却水箱腐蚀穿漏。

对碳化塔实施阳极保护，是把碳化塔的塔体和冷却水箱作为阳极，接直流电源的正极；另外加入塔内的辅助阴极（塔内阴阳极之间必须严格绝缘）接直流电源的负极。通以电流后，随电流的增大，塔体和水箱的电位逐渐向正方移动（即阳极极化），当达到较正的钝化电位时，碳钢在碳化液中就发生钝化。随着钝化的产生，碳钢的溶解速度会急速降低，腐蚀可以几乎停止。因此，维持一定的电位，保持塔体和水箱在碳化液中处于钝化状态，可以达到防腐的目的。这就是我们通常说的碳化塔阳极保护。

简单地说，阳极保护就是借助于外加电流，使被保护金属设备阳

极极化，获得并维持设备处于钝态以防止腐蚀的方法，叫做阳极保护。

从这里我们了解到阳极保护的实现是基于钝态的获得和保持。那末就有必要进一步弄清什么叫钝化和获得钝态的金属可以降低腐蚀的原因等问题。

二、金属的钝化

1. 金属的钝化和过钝化现象

化学钝化：如果我们把一块铁放在稀硝酸中，它会剧烈地溶解，并冒出红烟。但是当我们逐渐地提高硝酸浓度，当超过40%左右，铁的腐蚀速度就突然下降到原来的四千万分之一，这一现象我们称之为钝化。如果继续增加硝酸浓度，使超过90%左右，其腐蚀速度又上升（在95%的硝酸中的腐蚀速度为90%中的10倍）这一现象我们称之为过钝化。

阳极钝化：如果我们把不锈钢浸在中等浓度（如30%）的硫酸中，它也会剧烈的溶解，但是如果外加电流使之阳极极化，那么在达到一定电位时，不锈钢的溶解速度即降低到原来的数万分之一。又如我们看到的碳钢制的碳化塔处在碳化液中，它会因阳极溶解而产生腐蚀。如果我们借助外加电流使之阳极极化，那么在达到一定电位时，碳化塔发生钝化，腐蚀可以几乎停止。这种现象我们称之为阳极钝化。

从上面的事例可清楚地看到，金属从溶解着的活态变成钝态，有几个明显的变化。

(1) 电位从较负值跃升至较正值。如铁在硝酸中活态时的电位值为-0.4伏，钝化后电位就立即升至+1.0伏。又如碳钢在碳化液中活态电位为-0.8伏（相对饱和甘汞电极），钝化后电位跃升至+0.8伏左右。

(2) 金属表面状态发生了质的变化，生成了吸附的或成相的氧化物

层。

(8) 金属的溶解速度大大降低

由此可见，钝化现象的发生，金属溶解的阳极过程所遵循的规律发生了质的变化。通过这些现象的观察和讨论，我们对金属的钝化可以归纳如下：

在一定条件下，当金属的电位由于外加阳极电流或局部原电池阳极电流而移向正方时，原先活泼地溶解着的金属表面的状态发生某种突变即形成氧化物膜或吸附膜。由于这种突变，阳极溶解过程所服从的规律性也发生了质的变化，（此时溶解过程不再服从一般的塔菲尔公式）而金属的溶解速度随之急剧下降。表面状态的这种突变过程称之为钝化。金属钝化后所获得的性质称之为钝性。金属钝化后所处的状态称之为钝态。

金属的钝化与电解质的组成、浓度、温度和金属中合金元素的组成有关。一般说来，介质温度愈高，钝化愈困难。金属中添加易钝化的元素如铬（Cr）、镍（Ni）等会使金属容易获得钝性。

氧化性介质并不一定是金属钝性的唯一条件。在非氧化性介质中，也有发生钝化的场合。如镁在氢氟酸中，钼、钛和锆在盐酸中能发生阳极钝化等等。

已钝化的金属在改变外界条件后，仍能在相当程度上保持钝态。如碳钢在氨水中，用外加电流法，建立钝化一定时间后，切断电源，在一段时间内，碳钢仍处在钝态。

钝化了的金属，当金属表面受到机械磨损，或加入活化离子、升高介质温度等因素，都会发生金属的去钝化作用。

使金属失去钝性的介质（或离子）称为活化剂。活化性强的离子，主要是卤族元素的离子。其活化性顺序：



这是由于它们的离子半径较小，易于透过钝化膜的缘故。

至于过钝化，是在很正的电位下，或者由于起钝化作用的保护膜（氧化膜或吸附膜）发生了破坏；或者由于新的阳极反应的发生，阳极过程所服从的规律性再一次发生质变，此时金属溶解的速度比处在钝态时加速了，这一现象称为过钝化。

这里应该强调指出：钝态的金属仍具有较大的被氧化能力。只不过由于它表面状态发生了变化，使溶解速度大大降低罢了，这时金属的溶解并没有百分之百的停止。此外钝化金属的表面状态虽然发生了变化，但金属的物理性质并无变化。

2. 获得钝态的金属，其腐蚀速度降低的原因

钝化现象虽然被人们发现较早，也进行了一些研究工作。但由于钝化现象比较复杂，至今对于金属为什么产生钝化现象，为什么钝化后的金属腐蚀速度强烈降低等问题还没有统一的想法，在这方面主要存在着两种不同的观点和解释。

(1) 钝化膜理论（成相层理论）：

钝化膜理论认为，在一定条件下，金属表面能生成一层保护膜——钝化膜，使阳极过程受到极大的阻滞。这就发生钝化现象：金属的稳定性提高，电位显著地向正方移动。

钝化膜是与金属相不同的另一相，它类似于氧化膜，但又不同于普通的氧化物。例如，铁和普通氧化物是 FeO 、 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ，它们都溶于硝酸。铁在硝酸中的钝性显然不是这种普通氧化物所造成。实验证明，铁在某种条件下能生成复杂的氧化物，组成为 $\gamma-Fe_2O_3$ ，它不溶于硝酸和硫酸。钝化膜具有这样的特性：连续、致密、牢固附着在金属表面；本身的化学稳定性较高；能阻止金属正离子穿透但却

有良好的电子导电性。因而，钝化的表面能阻止金属腐蚀，但并不能阻止其它电极过程——例如氧析出或某些付反应的进行。可见，钝化膜的防腐道理并非象漆膜那样起一种纯粹机械性隔离作用。膜的厚度可为几个分子以至几百个分子厚，肉眼不可见或可见，可以用化学方法将某些钝化膜从金属表面取下来，光学方法也能确证膜的存在并测出其厚度，如在浓硝酸中，铁上的膜厚约 $25 \sim 30 \text{ \AA}^{\circ}$

($1 \text{ \AA}^{\circ} = 10^{-8} \text{ cm}$)，钢上为 $100 \text{ \AA}^{\circ}$ ，不锈钢上为 $9 \sim 10 \text{ \AA}^{\circ}$ 。

(2) 吸附理论

在一定条件下，电极表面吸附了氧原子或氧分子或其它物质，使金属腐蚀的阳极过程受到阻碍，同时电位向正方移动——出现钝化现象。这就是钝性的吸附理论。

吸附层可以是连续的单分子层，但在某些情况下，吸附的量即使不足以形成单分子层，也能使金属具有明显的钝性。就是说，由于吸附作用，氧饱和了所有金属表面原子的活泼价，使金属表面稳定性提高。氧的吸附，可影响双电层结构，因而改变金属表面的化学、电化学性质。

以上两种理论均有大量的实验根据，能解释一部分钝化现象，但只用一种理论又都不能解释全部钝化现象，而且这两种理论本身也还有许多问题尚未解决。是否能说，在某种情况下，金属钝性是因成相层而引起，在另一些条件下，则由吸附层引起，或者，在某些时候，两者同时起作用？这尚待今后深入研究。

不论机理如何，这个现象都是肯定的，金属的钝化，必须有一定的条件，钝化后的表面并非绝对稳定，而是处于一种交换速度很低的动态平衡状态，腐蚀过程仍在缓慢进行，一旦条件破坏，钝性将消失，出现活化现象，例如存在卤素离子，就会破坏钝性，金属表面将出现

极大的腐蚀速度，形成穿孔腐蚀，卤素离子浓度愈大，活化作用愈强烈。

三、阳极保护的基本原理

阳极保护实质上就是钝性的一种利用。为了进一步了解和利用钝性就必须研究金属的阳极溶解的行为。下面用恒电位法测得的碳钢在

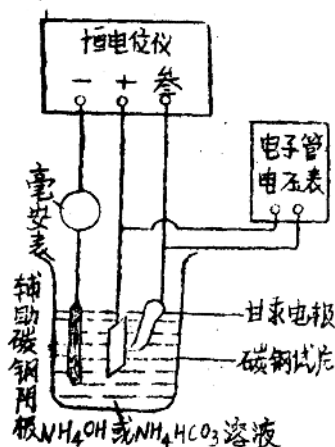


图 6-1 测定恒电位阳极极化曲线的简单装置

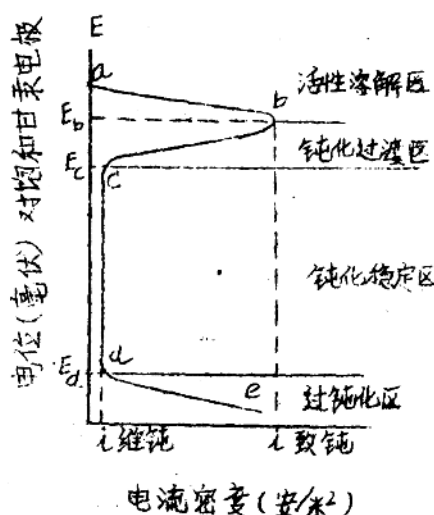


图 6-2 碳钢在 NH_4OH 或 NH_4HCO_3 中恒电位阳极极化曲线的示意图

NH_4OH 或 NH_4HCO_3 中的阳极极化曲线的示意图来说明。

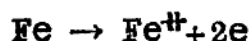
按照图 6-1 的装置可以测得图 6-2 的阳极极化曲线。所谓恒电位极化是在维持给定碳钢每一电位值恒定的情况下测得相应的电流。图 6-1 中示出的恒电位仪，是作直流电源和自动维持给定电位恒定的专门仪器。当我们旋转恒电位器的旋钮逐渐升高并测量碳钢试片的电位，同时测量通过它的电流时，就可以得到如图 6-2 所示的恒电

位阳极极化曲线。

图 6-2 的曲线表明：碳钢在 NH_4OH 或 NH_4HCO_3 中当通以阳极电流时，（从 a 点开始）电流随电位的上升（即电位往正方向移动）而增大，到达 b 点时，电流突然减小。这是因为在金属表面已经开始生成一层电阻高而又耐腐蚀的钝化膜。电流降低至 c 点以后，电位即使再继续上升，电流仍保持在一个基本不变的很小的数值上。当电位上升至 d 点时，电流又开始随电位的上升而增大。从 a 点到 b 点的电位范围称为活性溶解区；b 点到 c 点称为钝化过渡区；c 点到 d 点称为钝化稳定区；d 点以上称为过钝化区。对应于 b 点的电流密度称为致钝电流密度；对应于 c-d 段的电流密度称为维钝电流密度。如果对碳钢通以对应于 b 点的电流（致钝电流），使其表面生成一层钝化膜，电位进入 c-d 区（钝化区），再用维钝电流将其电位维持在这个区域内，保持其表面的钝化膜不消失，那末碳钢的腐蚀就会大大降低。这就是阳极保护能够停止腐蚀的道理。

在图 6-2 的恒电位阳极极化曲线中：

在活性溶解区：铁按两价的形式溶解。



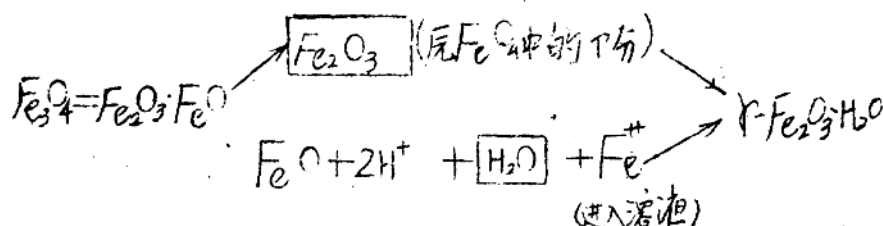
在此区段内，电位越正，电流密度越大，铁的溶解速度也越大。如果所通电流对应的电位在活化区，则不但起不了保护作用，反而加速了金属的溶解，这就是一般所说的电解腐蚀。溶解下来的铁离子 Fe^{2+} 进入溶液并迅速同金属界面附近的氢氧离子 (OH^-) 结合，生成不具有保护性的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ↓



可见，活化区是一个危险区。但由于建立钝化的过程中又必须经过该区，所以一定力求缩短致钝过程中金属在活化区的停留时间。

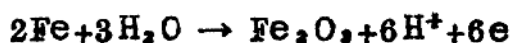
在钝化过渡区：它是一个不稳定的电位区，处于钝化——活化的过渡状态。在该区内，随着电位的正移，低碳钢进一步氧化（即取走的电子数越多），这时在金属表面开始生成具有尖晶石（ $\text{NiO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ——铝酸镍）结构的 Fe_3O_4 层。 Fe_3O_4 的致密度比吸附于金属表面的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 层高，铁离子（ Fe^{2+} ）进入溶液受到一定阻挡，金属的腐蚀速度有所下降。但因金属表面这层膜的保护性能比较差，金属的溶解速度仍然较大。

在钝化稳定区：从钝化过渡区到稳定钝化区的过程，是金属表面膜的组成逐渐改变的过程。 Fe_3O_4 我们可以把它看成 Fe_2O_3 和 FeO 的化合物。随着电位的正移， Fe_3O_4 进一步氧化，其中的 FeO 部分的二价铁离子（ Fe^{2+} ）被氢离子（ H^+ ）所取代，形成含少量结晶水，稳定的尖晶石结构的 $\text{r-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。



$\text{r-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 是一种组织密实的物质，它存在于低碳钢的表面，形成一层致密的附着性良好的钝化膜。对铁离子的溶解起着强烈阻挡作用，阻滞了阳极过程的进行，起到了良好的保护作用。

但应该指出，三氧化二铁所形成的膜，在碳化液中，不能永远保持下去，它将因化学和机械的原因逐步溶解和破坏，导致钝化膜的消失。解决这个问题的办法是设法使新的 Fe_2O_3 不断生成，维持住碳钢表面 Fe_2O_3 保护膜的存在，所以需要不断的通以电流，促进下式向生成 Fe_2O_3 的方向进行。



式中的电量(6e)就是为了促使反应进行而取走的电子数,即维持钝化所需的电流。由此可见,在钝化稳定区中,钝化膜在不断的溶解,同时又再不断的生成,即处于一种不断更新的状态。

在过钝化区:对过钝化区的电极状态,目前国内各单位的看法不一致。对于在过钝化区,当电位达到析氧电位时,会发生析氧反应



其看法是一致的。但对于过钝化时钝化膜的状态确有不同的实验依据和观点。

一种观点认为,在过钝化区,随着电位的正移,阳极电流密度成直线增加,曲线出现了一个水平区,膜电阻明显降低,过钝化阳极溶解过程开始出现。电位继续正移,逸氧开始,电流密度直线增加,低碳钢的电位增加极缓慢,致使钝态严重破坏,腐蚀速度随外加电流的增加而增加。

另一种观点认为,在过钝化区,当达到析氧电位时,析氧反应发生,但钝化膜不会破坏,低碳钢腐蚀速度并非加剧,此时阳极电流密度的增加几乎全部消耗于 O_2 的析出上。

但应该指出,电位过度深入钝化区,将有可能使电解腐蚀重新发生,其耗电量约为总通入电量的 $\frac{1}{100}$,这同活化区虽然完全不相同,但严重的过钝化是要防止的。至于析出的氧对钝化膜有无机械破坏作用,有待进一步研究,至于析出的氧还有对联合保护中的涂料起破坏作用,下面还要阐述。

四、阳极保护的主要参数

一般说来,阳极保护有三个主要参数:致钝电流密度、维钝电流密度、稳定钝态区范围。但在工业上应用时,还必须重视另外两个参

数：自活化时间、分散能力。

1. 致钝电流密度 $i_{致}$

$i_{致}$ 的数值反映出体系致钝的难易。虽然， $i_{致}$ 小的体系，致钝比较容易。如果 $i_{致}$ 很大，要使设备表面进入钝态，就需有大功率的电源设备，尤其当被保护设备表面积很大时，往往很难实现或且要采用一些特殊措施才能实现，如分层钝化。

影响 $i_{致}$ 的因素主要是金属的本性、温度、溶液组成。例如加入铬能使铁基合金的 $i_{致}$ 减小，降低温度能使 $i_{致}$ 减小，向溶液中加入氧化剂也能使 $i_{致}$ 减小。同一种金属，在某种溶液中 $i_{致}$ 较大，在另一种溶液中 $i_{致}$ 可能较小。

$i_{致}$ 还与所需钝化时间有关。由于钝化膜的生成需要一定的电量。对于一定的电量、时间越长，所需电流就越小。所以，延长建立钝化的时间，可以减小致使金属钝化的电流密度。但是，若电流密度低于某一数值，那么，时间再长也不能产生致钝作用。因此，当采用恒流法来测求使金属进入钝态所需的电流密度时，如果用能否进入钝态作为判断标准，得到的将是一组电流密度数据，在这些数据范围内都能使金属钝化，但对应的时间有长有短。例如在 $1N H_2SO_4$ 中，为了使碳钢钝化，所用的电流密度与致钝时间有如下关系：

所用电流密度 (安/米 ²)	致钝时间 (秒)
20×10^3	2
5×10^3	15
4×10^3	60
2×10^3	不能钝化

可见，我们不能把“致使金属进入钝态所用的电流密度”直观地理解为就是“致钝电流密度”。致钝电流密度是一个含有一定物理意义的参数。它指的是相应于图 8-2 中 E_b 电位下的外加电流密度。大于 $i_{致}$ 的电流固然可以使金属钝化，但是 we 不应把那些大于 $i_{致}$ 的数值都叫致钝电流密度。正如水的冰点含有一定的物理意义一样，在一个大气压下为 0°C ，当温度为 -10°C 时，当然可使水结冰，但我们不能把 -10°C 也叫水的冰点。通常， $i_{致}$ 是从恒电位阳极极化曲线上得到的，但由于测量速度，测量条件稍有差别都会造成 $i_{致}$ 的差别，因此很难得到严格确定的、完全重现的 $i_{致}$ 值，只能测得一个大约值。

2. 维持钝态电流密度 $i_{维}$

$i_{维}$ 数值反映出阳极保护正常操作时耗用电流的大小。在一定条件下，也反映出保护效果（例如，金属电位偏离氧的析出电位远，溶液中不存在去极剂，并且又没有其它付反应时， $i_{维}$ 就和腐蚀率等效）。

$i_{维}$ 与金属本性、温度、溶液组成等因素有关。在已钝化的条件下，如果阳极上有付反应进行，常常使 $i_{维}$ 增加，尽管金属的腐蚀率没有增加。

用恒电位仪使金属很快进入钝态并维持在某一钝态电位下，通过电极的电流密度起先较大，随着时间的延长，该值逐渐减小，经过一定时间后，达到一稳定值， $i_{维}$ 与 $i_{致}$ 一样，也包含一定的物理意义，它指的是某一特定值——相应于稳定钝态区电位下的外加电流密度。

3. 稳定钝态区范围

这个参数的意义在于两点：它直接表示阳极保护控制指标；它的宽度体现了阳极保护的安全性。稳定钝态区很宽的体系，实行阳极保

护就比较安全，它不但允许设备电位因某种原因发生较大范围的波动，同时能适应形状比较复杂的设备进行阳极保护的要求，对直流电源要求也不高，用普通的硅整流器也可以获得较好的保护效果。

对于稳定钝态区窄的体系，必须采用恒电位装置，对设备电位进行自控，使之总保持在所选择的指标内。

影响稳定钝态区范围的主要因素是金属材料 and 腐蚀介质的性质。

表 6-1 列出了部分金属材料在某些化学介质中阳极保护的三个主要参数。

4. 自活化时间

对于阳极钝化后的金属，如果切断维持钝化的外电流，金属电位将逐渐向负方移动，最终跃变到活化区，金属的钝性消失。这一过程，称自活化过程，所需的时间即为自活化时间，也有人称之为“钝化膜寿命”。

金属在钝态下的溶解速度愈小，在钝态下保持的时间愈长，断电前的钝态电位愈正，自活化时间都会愈长。溶液中氧化剂的存在会大大增长钝化膜的自活化时间。

对不同体系而言，断电后电位向负方移动的规律是不相同的；就同一试验条件来说，断电后电位负移的速度也不均匀——起先很快负移，到一定电位即滞留一个时期，然后突然跃变到活化电位区如图 6-3 所示。对于已钝化的金属，如果擦伤表面或受结晶冲刷、还原性气体作用，特别是阴极电流作用，都会加速电极的自活化过程。假如自活化时间极短，对阳极保护是很不利的。因为偶然的断电、液位的波动，或其它意外因素都将使设备全部或局部活化。如果自活化时间很长，在出现上述偶然事件的时候，或者人为地断电，降低液位以处理生产问题的时候，将允许人们去把问题作妥善处理，而不致于造

表 6-1 部分金属材料在某些化学介质中阳极保护的三个主要参数

介 质	材 质	温 度 (°C)	致钝电 流 密 度 (安/米 ²)	维持电 流 密 度 (安/米 ²)	钝化区电位范 围 (毫伏)	备 注
105% H ₂ SO ₄	碳 钢	27	32	0.31	+1000 以上	钝化区电位范 围凡未标明是 对铂电极电位 者,一律是对 甘汞电极电位。
96-100% H ₂ SO ₄	"	93	6.2	0.46	+ 600 以上	
96-100% H ₂ SO ₄	"	279	930	3.1	+ 800 以上	
88.9% H ₂ SO ₄	"	27	155	0.155	+ 400 以上	
67% H ₂ SO ₄	"	27	930	1.55	+1000-+1600	
49.8% H ₂ SO ₄	"	27	2325	31	+ 600-1400	
44.6% H ₂ SO ₄	"	27	2325	剧烈波动	-	
96% H ₂ SO ₄ 被 Cl ₂	"	50	2-3	1.5	+ 800 以上	
饱和 76% H ₂ SO ₄ 被 Cl ₂	"	50	20-50	<0.1	+ 800-+1800	
饱和 67% H ₂ SO ₄	不锈 钢	24	6	0.001	+ 20-+800	
67% H ₂ SO ₄	不锈 钢	66	43	0.003	+ 30-+800	