

医学仪器

(应用与设计)

(第二分册)

(美) 韦博思主编

西安交通大学医学电子工程教研室代装订

医 学 仪 器

(应用与设计)

(第二分册)

主编 (美) 韦 博 思
翻 译 集 体

江苏工业学院图书馆
藏书章

西安交通大学

医学电子工程教研室代装订

一九八二年五月

说 明

本分册由大连医学院陈秀文同志等翻译和印刷。由于时间限制未及校订和重印。即以遵义医学院原印稿略作校订使用。特此说明。

译 校 者 名 单

第五章 译者 陈秀文 (遵义医学院)

第六章 译者 相德有 王恩普

校者 张长城 黄辰格 陈秀文

第五章 生物电极

Michael R. Neuman

为了测量和记录体内的电势及电流，机体与测量仪器之间须有接界。接界的形成由生物电极来完成。任何实际测量电势的过程中，总有一段时间电流要通过测量电路。照理，此电流应是极小，但实际上，总不为零。因此，生物电极必须具有能力将电流传递过机体与电子测量电路之间的接界。

最初的印象以为要完成的工作是较简单的，而认为生物电极应该还是比较简易的。可是，当更仔细地考虑这问题时，可看到电极实际上是起着转换的作用，因为体内的导电是由于离子，而在电极及其导线中的导电则是由于电子。因此，电极必须作为一种换能器，把离子流变成电子流。这就使电极变成非常复杂而在应用时带来不便。我们将简单地探讨关于转换过程的基本机理，并指出它将如何影响电极的特性。其次将探讨生物电极的电特性原理并讨论在这些特性基础上的电极的等效电路。然后，将介绍一些不同型式的用于各类型医学仪器系统中的生物电极，最后探讨用于探测 ECG、EEG、EMG 及细胞内电势的电极。

5.1 电极——电解质的接界

图5.1，简要地示出电极——电解质的接界，从电极通过一界到电解质的基本电流有(1)与在电极中电流方向相反运动着的电子，(2)运动与电流方向相同的阳离子(用 C^+ 表示)及(3)在电解质中运动方向与电流方向相反的阴离子(用 A^- 表示)。由于电解质内没有自由电子，而电极内亦没有自由阳离子或阴离子，要使电荷通过接界，必定在接界处发生某种变化，才能使这些电荷携带者之间互换电荷。在接界处，实际上所发生的变化就是化学反应，这种反应一般地可

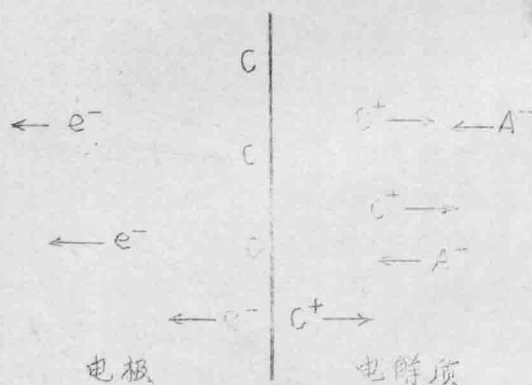


图5.1 电流从左到右通过的电极——电解质的接界。

电极含有金属原子 C 。电解质是一种水溶液，其中含着电极的阳离子 C^+ 和阴离子 A^- 。

用下式表示：
$$C \rightleftharpoons C^{m+} + ne^- \quad (5.1)$$

$$A^{m-} \rightleftharpoons A + me^- \quad (5.2)$$

其中 n 为 C 的原子价， m 为 A 的原子价。注意到(5.1)式，假使电极是由与阳离子相同材料的一些原子制成的，因而在接界处，这材料能够发生氧化而变成一个阳离子及一个自由电子。阳离子进入电解质，而电子则作为电荷携带者留在电极里。

(5.2)式给出有关阴离子的反应。这样，当阴离子来到电极——电解质接界时，能够被氧化成为中性原子，而放出一个或更多的自由电子到电极中去。

应注意的是这两种反应经常都是可逆的，因而，还原反应也同

样发生（在公式中由右到左进行）。事实上，当没有电流通过电极——电解质的界面时，这些反应仍然经常发生。只不过由于氧化反应的速率^{与还原反应的速率}相等，因此通过界面的净转换电荷等于零。当电流流动由电极到电解质时（如图 5.1 所示），氧化反应为主，而当电流流动方向相反时，则还原反应为主。

为了进一步了解电极——电解质接界的特性，让我们考虑一下，当把一片金属放入含有该金属离子的溶液中将发生什么情况。这些离子是阳离子，而溶液如果保持电中性，那么溶液中必定也会有同样数目的阴离子。当金属与溶液接触时，由 (5.1) 式所表示的反应作用将立刻开始。反应向左进行为主还是向右进行为主，则由溶液中阳离子浓度和该反应的平衡条件所决定。溶液中交界处的局部阳离子浓度起了改变，这也影响该处阴离子的浓度。最后结果是：在此区域的电荷不再保持中和。因为，包围在金属周围的电解液处于与其余电解液不同的电势，根据所用的金属、溶液中离子浓度、温度以及其他次要因素，可测出其电势差，这电势差称为半电池电势。半电池电势的知识对于理解生物电极的作用极为重要。

金属——电解液接界附近的电解液中电离子的分布情况曾给电化学家以极大的兴趣，而且提出了几个理论来描述其情况。Gellps (1972) 曾用这些理论中的四个理论来对电荷和电势的分布进行比较，而 Goffoll (1974) 在讨论半电池电势时亦考虑到 Stern 的模型。在这里与其仔细分析这些理论，倒不如接受其概括性的结论。他们总结为：在金属——电解质接界面存在着某种电荷分离，这形成了一种电偶极子层，其中一种电荷主要处于金属表面，与其相反的电荷则分布在紧连着的电解液中。

不可能用一个电极来测量半电池的电势，除非另加一个电极。因为我们不能在电解质与用来测量电势的仪器之间只有一根联接线，由于第二电极亦存在着半电池电势，因而，我们只能测到金属的半电池电势与第二电极的半电池电势之间的电势差。当然，可以组织成对的电极的组合数目必极多，这种半电池电势差如将其列表，其数量将极可观，为了避免这个问题，我们采用一个公认的标准，即用特定的电极——氢电极（此电极在实验室里极易获得）在一定的条件下定义半电池电势差为零。因此，就可测得所有其它电极材料

相对于此电极的半电池电势。

表 5.1 列出用于制造电极的一些普通材料，并给出其半电池电势。表中亦给出在这些电极表面所发生的氧化还原反应情况，以便得到所需的电势。氢电极的反应如下：



对铂电极喷射的 H_2 气泡就是氢分子的来源。在方程式左边的反应中铂作为一种催化剂，并且作为产生出来的电子的接受器。

金 属 和 反 应	电 势 E°, V
$\text{Al} \longrightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1.706
$\text{Zn} \longrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.763
$\text{Cr} \longrightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0.744
$\text{Fe} \longrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.409
$\text{Cd} \longrightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.401
$\text{Ni} \longrightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.230
$\text{Pb} \longrightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.126
$\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0.000 根据定义
$\text{Ag} + \text{Cl}^- \longrightarrow \text{AgCl} + \text{e}^-$	+0.223
$2\text{Hg} + 2\text{Cl}^- \longrightarrow \text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$	+0.268
$\text{Cu} \longrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0.340
$\text{Cu} \longrightarrow \text{Cu}^+ + \text{e}^-$	+0.522
$\text{Ag} \longrightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}^-$	+0.799
$\text{Au} \longrightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$	+1.420
$\text{Au} \longrightarrow \text{Au}^+ + \text{e}^-$	+1.680

表 5.1 25°C 时，普通电极材料的半电池电势。

标出的金属反应式符号和电势 E° 系以氢电极为基准。
 数据来自 Handbook of chemistry and Physics,
 55th edition, CRC Press, Cleveland Ohio,
 1974~1975, 并得到允许。

图5.2为氢电极的基本结构，一片铂箔或铂丝在其表面涂上一层常称为铂黑的极细的金属铂粉，由于其颗粒极细以致射到它上面的光线将被散射和吸收，因而其表面呈现黑色。表面经此处理后，有效面积大为增加而有助于化学反应，必须用铂，因为它比较地不活泼。此外，只有很少数的铂原子在铂—电解质界面处被氧化（如果有的话），铂电极沉浸在含有与被测半电池电势电极材料相同的阳离子的溶液中。在溶液中装有喷射 H_2 气体的喷口。此喷口对铂电极表面喷射出微小的氢气泡。一些吸附在铂电极表面的氢分子被折成氢原子。这些氢原子氧化成氢离子，当它把电子交给铂电极之后，就扩散到溶液中去。

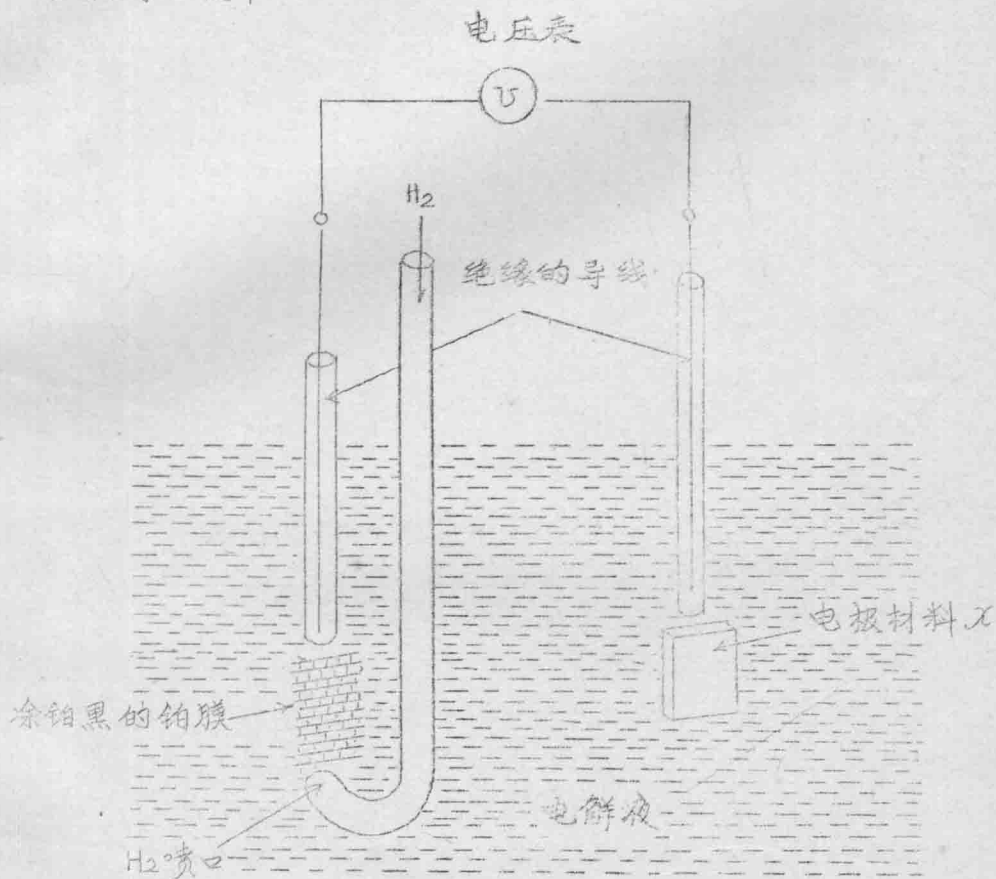


图5.2 电化学电池用于测量材料X的半电池电势。左边的电极是作为参比电极的氢电极，因为它的半电池电势被定义为零电势，伏特计必须有无限大的阻抗，才能指示出材料X的真实半电池电势。

电化学电池的结构中还有一个由被测半电池电势材料所制成电极。在这个电极与氢电极的铂片之间连接一个静电计（输入阻抗极大的伏特计）以便直接测读半电池电势。

比氢电极更便于使用的其他参比电极将在 5.3 节叙述。

5.2 极化

在 5.1 节中已叙述过在电极与电解液之间没有电流通过的情况下一个电极的半电池电势。可是，当有电流通过时，所观测到的半电池电势常有所差别。其差别原因是由于电极发生了极化。实测的半电池电势与平衡零电流半电池电势之间的电势差称为超电压。有三个基本机制对这个现象起作用。超电压可分为三个部分：欧姆性的、浓度和激活超电压。

欧姆性的超电压是直接由于溶液本身存在电阻的结果。当电流通过浸入于电解液中的二个电极之间时，由于电解液存在电阻，必有电压降落在电流所流过的路径上，此电压降落与电流及电解液的电阻率成正比。两电极之间的电阻本身能变化，它是电流的函数，因而欧姆性的电压降并非必然地与电流成线性关系。这一点，尤其在电解液离子为低浓度时是确实的。因此，在这种情况下并非必然地遵循欧姆定律。

浓度超电压的来源是由于电极——电解质交界附近的电解液中的离子分布发生了变化。回想到，平衡半电池电势的产生是由于当无电流通过电极与电解质之间时，在电极——电解质交界附近离子浓度的分布。在这些条件下，反应式 (5.1) 和 (5.2) 达到平衡，因此在交界处的氧化率和还原率是相等的，当建立了电流，这种相等不复存在，因而有理由能想到离子的浓度起了改变。这种改变导致电极有不同的半电池电势。这个不同的电势与平衡半电池电势之间的差别就是浓度超电压。

第三种极化机制导致激活超电压，在氧化——还原反应 (5.1) 式中，电荷转移过程并非全部可逆。为了使金属原子被氧化成为金属离子以便能进入溶液，原子必须克服一能垒。这能垒或称为活化能支配着反应的动力学。在逆反应中减少了一个阳离子，并在电极上镀上一个金属原子，这过程亦需活化能，但它并不需与氧化反应过程中所需的活化能相等。在电极与电解液之间，如有电流通过，不

管是氧化为主还是还原为主，此时能垒的大小系由电流流动方向所决定。这种能差在电极与电解液之间表现为电压差，这即称为活化超电压。

这三种极化过程是相加的，因此一个电极的净超电压可由下式给出：

$$V_p = V_r + V_c + V_a$$

其中 V_p = 总超电压或电极极化电势

V_r = 欧姆性超电势

V_c = 浓度超电势

V_a = 活化超电势

当不同浓度的二种离子溶液被一个离子选择半透膜所隔开时，就存在跨膜电势。Plonsey (1969) 指出，此电势可用 Nernst 公式来表示：

$$E = -\frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \quad (5.5)$$

其中 a_1 和 a_2 为薄膜两侧的离子活度（其它的符号在 4-1 节及附录中有说明）。稀溶液：，离子活度几乎与离子浓度相等。当分子间的作用不可忽略时（这现象将发生在高浓度时），离子的活度将比浓度小。

表 5.1 所列出的半电池电势称为标准半电池电势，因为它们的标准状态下使用。当电极——电解液系统不再处于此标准状态时，所观测到的半电池电势将与标准半电池电势不同，测出溶液中的温度及离子活度就可标出电势的差别。离子活度定义为溶液中一种离子参入反应的效率。

标准半电池电势是在标准温度下被测定的。此时电极放在含有相同活度的该电极材料的阳离子的电解液中。因浓度的改变而引起活度一致性的变化，根据 Nernst 方程式，半电池电势的改变如下：

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln (a_c^{n+}) \quad (5.6)$$

其中

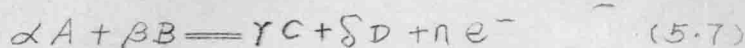
E = 半电池电势

E^0 = 标准半电池电势

n = 电极材料的原子价

a_c^{n+} = 阳离子 C^{n+} 的活度

方程式 (5.6) 为 Nernst 方程式对反应式 (5.1) 的具体应用, 这方程式用在普通的氧化——还原反应时, 可写成更普遍的形式如下:



其中有 n 个电子被转移, 在这种情况下, Nernst 的通用式为:

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{a_C^\gamma a_D^\delta}{a_A^\alpha a_B^\beta} \right) \quad (5.8)$$

其中 a 's 表示各种反应组成物的活度。

电势差的存在并不一定需要有电极——电解质交界, 如果离子迁移率, 离子浓度都不相同的二种电解质相接触, 则在两溶液之间就有电势差, 这被称为液体接界电势, 其量值由下式给出。

$$E_j = \frac{u_+ - u_-}{u_+ + u_-} \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{a_+}{a_-} \right) \quad (5.9)$$

其中 u_+ 及 u_- 为正负离子的迁移率, a_+ 及 a_- 为它们对应的活度。虽然液体接界电势通常不会有电极——电解质电势那么高, 可是它很容易达到几十毫伏, 例如, 在 25°C 下, 二个氯化钠溶液其活度由某种因素变化系数为 10 时, 则出现约 12 mV 的电势差。应注意, 仅在电解质中造成浓度差, 就会产生如某些生物电势大小的电势。当检查正在用于测量生物电的电极系统时, 亦应考虑到这个因素。

例 5.1 浸入在 1M 氯化锌溶液中的一个 Zn 电极和一个镀氯化银的 Ag 电极组成为一个电化学电池。溶液中 Zn^{2+} 和 Cl^- 的活度约相等。溶液温度保持在 25°C 。

a. 这些电极上可能出现什么化学反应?

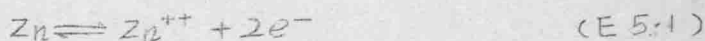
b. 如果在这些电极之间连接一个输入阻抗极高的电压表, 其读数是多少?

c. 连接电极的两根导线如果短路, 会有电流通过吗? 这将如何影响电极的化学反应?

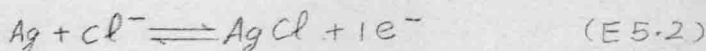
d. 在紧随短路去除后, 两电极间的电压跟开路平衡电压有何不同?

解:

a. Zn 比 Ag 更加活泼, 因此根据反应式



在Zn表层的原子氧化成 Zn^{++} ，从表(5.1)可知 E° 为 -0.763V ，又根据反应式



在Ag电极上，Ag被氧化成 Ag^{+} 离子，这个反应式在 25°C 时，有一个电势 $E^{\circ} = 0.223\text{V}$ 。

b. 当无电流从任一电极流出或不对任一电极供给电流时，则两电极间的电势差为两半电池电势之差。

$$V = E_{\text{Zn}}^{\circ} - E_{\text{Ag}}^{\circ} = -0.763 - 0.223 = -0.986\text{V} \quad (\text{E 5.3})$$

由于Zn在较高电势时氧化，锌中的电子比Ag中的电子有更高的能量，因此，Zn电极相对于Ag电极为负电压。

c. 由于两电极间存在着电势差，短路时有电流通过。因锌电极中的电子能量较高，故电子由Zn极流向Ag极。从而反应式(E5.1)由左向右进行，而反应式(E5.2)由右向左进行。

d. 两电极被连接在一起时，连接点的电势必相同，从而0.986伏的半电池电势差必与极化超电势和电极中及导线中的欧姆性损耗相对抗，当短接去除后，电流停止流动，欧姆性的超电势及电极损耗变成零，但浓度超电势仍存在，直到电极表面的离子浓度梯度恢复到在零电流时的平衡数值，因此两电极间的电压差小于0.986伏，但将随时间而渐升到此值。

5.3 极化电极和非极化电极

理论上，电极可有二种类型，一为完全极化的，另一为完全非极化的，这种分类与电流通过电极与电解液之间时，该电极发生何种现象有关。全极化电极是那些加上电流之后，又无实际电荷通过电极——电解质接界的电极，当然，那里必须有电流通过接界，但这电流为位移电流，而电极的性能却与电容相似。完全非极化的电极，是那些电流能自由地不需能量地通过电极——电解质接界的电极。因此，对于完全非极化电极而言，不存在超电压。

无法制造出完全合乎上述二种中任何一种特性的电极。然而，某些实用的电极可达到接近于它们的特性，用贵金属制造的电极最

接近于全极化电极的特性。因为这些电极材料是比较地惰性，难于使它们氧化及溶解。因而，通过电极与电解质的电流主要是改变界面处的离子浓度。因此，这种类型的电极所呈现的超电压是以浓度超电压为主，这类电极的电性质引起强烈的电容性效应。

银——氯化银电极

银——氯化银 ($\text{Ag}-\text{AgCl}$) 电极是一种近似于完全非极化电极特性的实用电极，在实验室中易于制作。有一类电极是在金属表面镀上一层该金属的离子化合物的薄膜，此化合物略可溶，并含有适当的阴离子。 $\text{Ag}-\text{AgCl}$ 电极就是这类电极中的一种。

电极的整个结构浸在一种含有阳离子浓度较高的电解液中。

图5.3为该电极结构的示意图。带有绝缘导线的银金属基底上镀一层离子化合物 $AgCl$ ， $AgCl$ 略溶于水，故甚稳定。然后把电极浸入电解槽中，槽内电解液的阴离子主要为 Cl^- 。为了得到最好的效果，电解液应采用 $AgCl$ 的饱和溶液，以避免电极表面膜发生溶解。

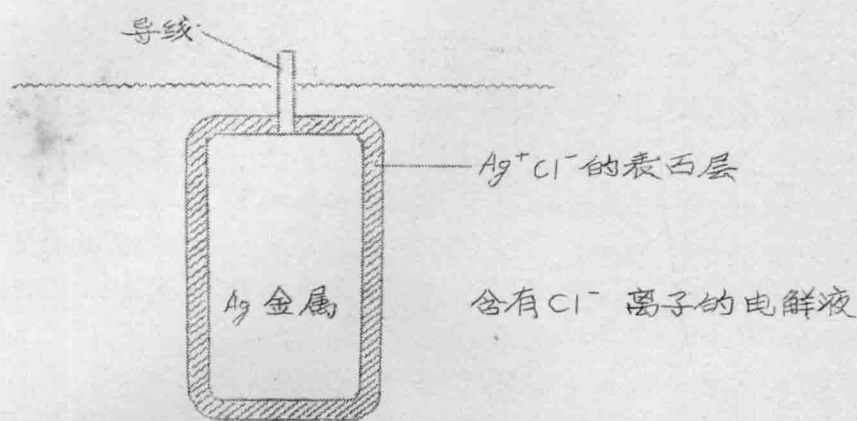
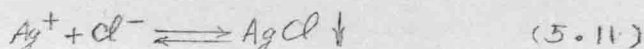


图5.3 银-氯化银电极的剖面图

银-氯化银电极的作用：由二种化学反应所决定。第一种反应为，溶液中在接触处的电极表面，银原子氧化成银离子。



第二种反应紧接着在 Ag^+ 离子形成之后发生，这些 Ag^+ 离子与溶液已有的 Cl^- 离子组成离子化合物 $AgCl$ 。如前所述 $AgCl$ 仅略溶于水，故其中绝大部分从溶液中析出而在银电极上沉积一层氯化银，氯化银的沉积率和返回溶液率为一常数 K_s ，称为溶度积，在平衡状态下， Ag^+ 和 Cl^- 的离子活度必然是它们的乘积等于溶度积。

$$a_{Ag^+} \times a_{Cl^-} = K_s \quad (5.12)$$

在生物体液中， Cl^- 离子的浓度相当高，活度略欠一致，另一方面， $AgCl$ 的溶度积为 10^{-10} 数量级，这意味着，当 $Ag-AgCl$ 电极与生物体液相接触时， Ag^+ 离子的活度必然很低，并与溶度积的数量级大小相同。

把反应式 (5.10) 写成 (5.6) 式, 则可测求 $\text{Ag}-\text{AgCl}$ 电极的半电池电势。

$$E = E_{\text{Ag}}^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln(a_{\text{Ag}^{+}}) \quad (5.13)$$

利用 (5.12) 式, 又得

$$E = E_{\text{Ag}}^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{K_s}{a_{\text{Cl}^{-}}}\right) \quad (5.14)$$

或

$$E = E_{\text{Ag}}^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln(K_s) - \frac{RT}{nF} \ln(a_{\text{Cl}^{-}}) \quad (5.15)$$

上式右侧第一项和第二项为常数, 仅第三项由离子活度来测定, 此例中, 它是 Cl^{-} 离子的活度, 具有很大的负值, 而且与 Ag 氧化无关, 其原因系由于电流通过电极之故, 当将此电极放在含 Cl^{-} 阴离子为主的电解液之中, 电极的半电池电势必极稳定, 由于这是合乎体内的情况, 我们将在本章后部得知, $\text{Ag}-\text{AgCl}$ 电极在生物学应用中是相当稳定的。

Janz 和 Ives (1968) 回顾了可用于制造 $\text{Ag}-\text{AgCl}$ 电极的几种方法, 其中两种方法在生物电极制造上尤其重要。图 5.4 表示制作 $\text{Ag}-\text{AgCl}$ 电极的电解过程, 接装一个电化学电池, 其中把要沉积 AgCl 层的银电极作为阳极, 把另一片比阳极面积大的银片作为阴极。用 1.5 伏的电池作为电源, 并串联上一个电阻以限制峰电流, 故可控制最大的反应率。线路中可接入毫安表以便观察电流, 该电流的大小与反应率成正比。

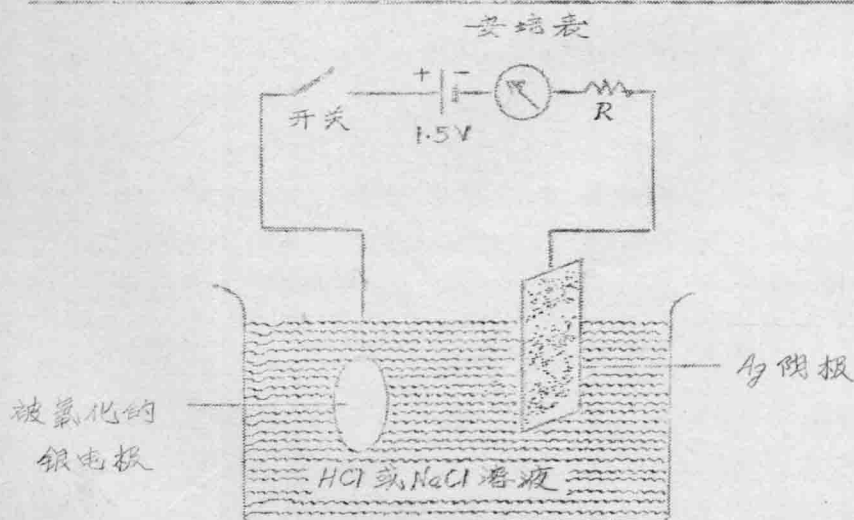


图 5.4 一个电化学电池常使 Ag 电极表面生长一层 AgCl 薄膜

当开关闭合时, (5.10) 式和 (5.11) 式的反应就开始, 同时电流跃迁到最大值, 当 AgCl 淀积层厚度渐增时, 反应率则渐减而电流下降。这情况继续进行, 而电流渐趋向于零。理论上, 电流降到零之前反应不会结束, 实际上, 这种现象从不发生, 因为其他亦在进行着的过程起了传导电流的作用。因此, 一旦电流达到相当稳定的低数值之后数分钟, 反应就会停止。对于绝大多数数的生物电极来讲, 此稳定的低值电流为 10 nA 数量级。

例题 5.2 用电解法使 Ag 电极上生长一层 AgCl 膜, 在生长 AgCl 层的过程中, 对流过电池的电流进行了测量及记录, 发现电流要用下式表示

$$I = 100 \text{ mA} e^{-t/10} \quad (\text{E 5.4})$$

a. 假若让反应持续一长段时间, 使电流基本为零, 那么有多少电荷来自推动反应的电池?

b. 在反应过程里有多少克的 AgCl 淀积在电极表面?

c. 电极放在装有 1 升生理盐水 (0.9 克分子的 NaCl 溶液) 的烧杯中。问 AgCl 溶解了多少?

解:

a. 横跨在电极—电解质接界的总电荷为

$$q = \int_0^{\infty} I dt = 100 \text{ mA} \int_0^{\infty} e^{-t/10} dt \quad (\text{E 5.5})$$

$$= 1\text{C}$$

b 对每个电子要淀积一个 AgCl 分子, 淀积的原子数目为

$$N = \frac{1\text{C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C/个电子}} = 6.25 \times 10^{18} \text{ 个电子} \quad (\text{E 5.6})$$

除以阿伏伽德罗常数可得到克分子数

$$N = \frac{6.25 \times 10^{18}}{6.03 \times 10^{23}} = 1.036 \times 10^{-5} \text{ 克分子数} \quad (\text{E 5.7})$$

AgCl 的分子量为 142.3, 所以 AgCl 的重量为

$$142.3 \times 1.036 \times 10^{-5} = 1.47 \times 10^{-3} \text{ 克}$$

c. 对于 AgCl , 当温度为 25°C 时, 溶度积 $K_s = 1.56 \times 10^{-10}$, 在这些低浓度情况下, 活度与浓度几乎相等。从而

$$[Ag^+][Cl^-] = 1.56 \times 10^{-10}$$

$$[Cl^-] = 0.9 \text{ 克分子/升}$$

$$[Ag^+] = 1.73 \times 10^{-10} \text{ 克分子/升}$$

因此， $AgCl$ 必会溶解掉 1.73×10^{-10} 克分子，或换算成质量，则成为

$$1.73 \times 10^{-10} \times 142.3 = 2.46 \times 10^{-8} \text{ 克}$$

制造医学仪器用的 $Ag-AgCl$ 电极的第二种方法为烧结法，应制成小丸形电极 (pellet electrode)，如图 5.5 所示。电极的结构是在一根金属导线周围包着一个烧结的 $Ag-AgCl$ 圆柱体。它的制法是：把一根洁净导线放进模具，然后填充以 Ag 和 $AgCl$ 混合粉末，把模具放在 arbor 压机上加压，使粉状物形成一个小柱体，然后从模具中取出，放在 $400^\circ C$ 温度中烘烤数小时即成，这些电极往往比电解液中的 $AgCl$ 电极的寿命更长，因此这种电极最适合于需重复使用的场合。电解液中的氯化银在机械应力作用下有可能剥落，以致暴露的金属银与电解液发生接触。

除了不被极化的性能之外， $Ag-AgCl$ 电极显示出比相同的银电极有更低的噪音，如图

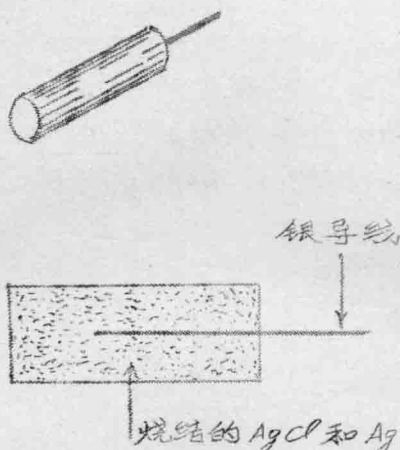


图 5.5 烧结的 $Ag-AgCl$ 电极

5.6 所示 [Geddes and Baker (1957)]

该图係用一对 1.35 mm 的银质球形电极浸入生理盐水中记录而得。在图 5.6 (A) 中，三组电极的表面都有一层用图 5.4 所示的粉末进行电解生长的 $AgCl$ 层。在进行记录之后，电极从生理盐水中取出，并把所有电极的 $AgCl$ 层磨掉。之后再放回溶液中，而得到图 5.6 (B) 的记录，再一次在电极上进行电解生长 $AgCl$ 层，并作出图 5.6 (C) 的记录。从记录中显然可看出，具有 $AgCl$ 层的电极噪音远低于磨掉 $AgCl$ 层后的电极噪音。并且，对于纯金属的电极，其噪音多属低频。这对于进行低频记录（如脑电图）会带来极严重的干扰。