金属电化学腐蚀等效电路中的腐蚀电流 $I_{腐}$ 可近似用下式表示：

$$I_{腐} = (Ea + Ec)/(Ra + Rc + R)$$

式中：$I_{腐}$——腐蚀电流

Ea——腐蚀电池中的阳极电位

Ec——腐蚀电池中的阴极电位

Ra——阳极极化电阻

Rc——阴极极化电阻

R——电解质溶液电阻

由上式可知，要阻止金属腐蚀，就要设法使用 $I_{腐} = 0$。采用涂层的办法就是增大 Ra、Rc，使 Ra + Rc + R 增大至接近无限大，使 $I_{腐} \to 0$ 而阻止腐蚀；采用阴极保护就是对被保护体施加负的阴极电位，使 Ea + Ec = 0 而阻止腐蚀。

三、地下金属管道腐蚀

(一)、腐蚀原因

长距离输油(气)管道都埋入地下，常因所处的土壤环境复杂而导致电化学腐蚀，发生局部穿孔。油(气)管道由于输送介质对国民经济的重要性而具有特殊意义，一旦管道破损，除油(气)漏失、引起火灾等直接损失外，还会因停油停气造成更大的间接损失。因此，长期以来，如何防止地下金属管道的腐蚀损坏，是防腐工作的重要内容。

埋地金属管道按其腐蚀部位的不同，可分为内壁腐蚀和外壁腐蚀两种情况。内壁腐蚀是由于输送介质中的水在内壁生成水膜而形成原电池腐蚀条件所发生的电化学腐蚀。此外，天然气中有

硫化氢、二氧化碳和硫化物等，也可直接与金属发生反应，引起化学腐蚀。因此，在架空管道或埋地管道的内壁，一般同时存在化学腐蚀和电化学腐蚀，但也可能只存在一种腐蚀。

金属管线外壁腐蚀的原因比较复杂，一般可归纳为三种类型：

1、土壤腐蚀

地下金属管道的外壁腐蚀主要是土壤腐蚀。土壤腐蚀基本上属于电化学腐蚀，因为土壤含有水分和少量的酸、碱和其它盐类，故可以认为是一种复杂的电解质，地下金属管道本身是不均匀的，含有杂质或不同成分，金相组织也不同，因而在管道上各部分间常具有不同的电极电位，当金属管埋入地下，管和土壤之间就可能出现各种类型的腐蚀电池。

(1)、因钢管表面状态的影响形成的腐蚀电池(微腐蚀电池)

由于制管上的缺陷，管道金属内可能夹杂有不同的杂质、溶渣，又如焊缝及其附近的热影响区与本体金属之间、钢管表面氧化膜(锈、轧屑)与本体金属之间性质差异均较大，故当这些组成不均匀的管道与土壤接触时，就好象几块互相能导电的不同金属放在电解质中一样，在有差异的部位上，由于电极电位差而构成腐蚀电池。如钢管的焊缝溶渣和本体金属间的电位差可能高达 0.275 伏。

图 1.3.1 的 a、b、c 表示由于钢管表面条件的不同而发生的三种腐蚀状态。

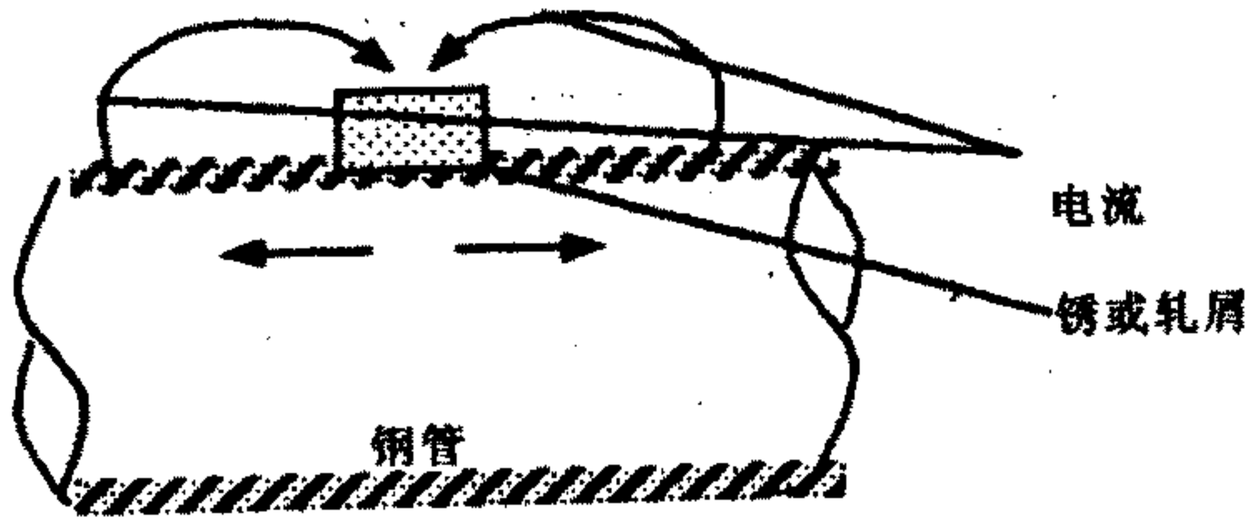


图 1.3.1a 钢管表面的锈或轧屑对钢管为阴极，腐蚀发生在钢管(阳极)区。

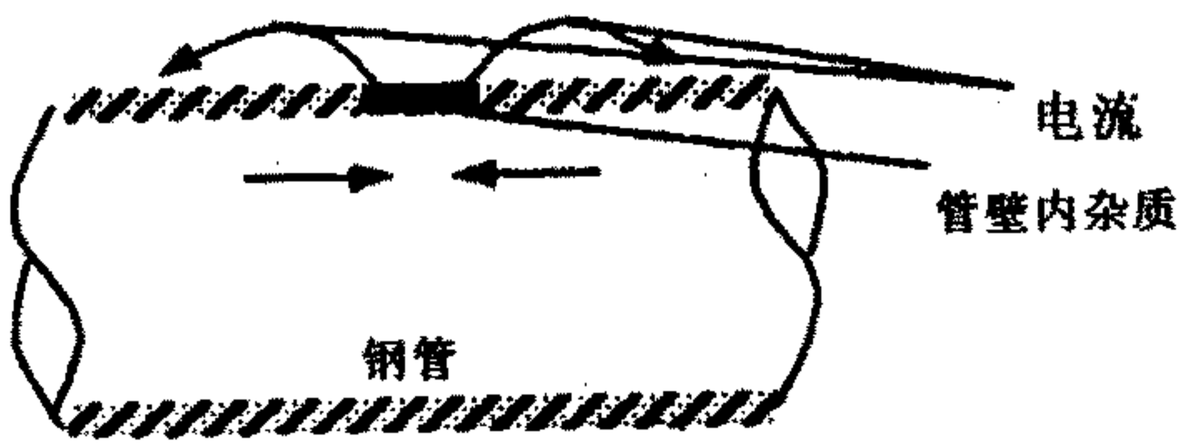


图 1.3.1b 钢管内壁有杂质，对钢管为阳极，腐蚀发生在杂质处。

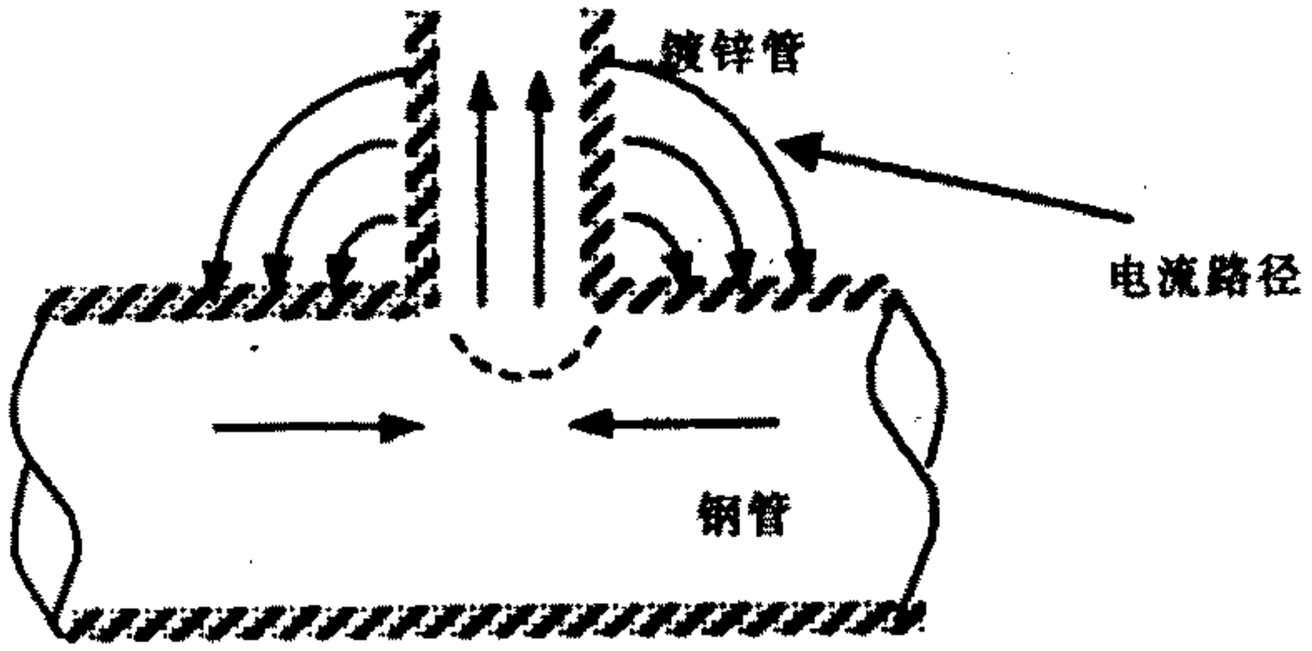


图 1.3.1c 不同金属间的接触。当把镀锌管与碳钢管连接时，镀锌管发生腐蚀。

如果把一段新的钢管与旧的生锈的钢管连接时，也会有同样效应。

(2)、因土壤腐蚀介质差异引起的腐蚀电池(宏腐蚀电池)

影响土壤腐蚀性的因素很多,其主要有土壤的孔隙度,导电性、溶解的盐类、含水率、PH 值及细菌等。由于管道可能经过物理性和化学性差异很大的土壤区,由土壤性质差异形成的宏腐蚀电池对管道的腐蚀远较对其它钢铁构筑物的腐蚀更有决定性的意义。土壤的含盐量和透气性(含氧量)对管道腐蚀的影响最大,它们都对地下管道的钢/土壤电位有影响。在含盐量高的土壤中,钢/土壤电位要比在含盐量低的土壤要负些,所以当管线从含盐量不同的土壤中经过时,与盐浓度最高的土壤接触的钢表面腐蚀最严重,如图 1.3.2a 所示。该图是由钢管和两种含盐量不同的土壤所组成的系统,相当于一个导体与两种浓度不同的电解液相接触所形成的一个原电池,通常称它为"浓差电池"。在该电池的阳极区和阴极区之间流通的电流强度(腐蚀电流),在一般情况下,是两电解液离子浓度差的函数。

同样钢铁埋在透气性差(含氧量低)的土壤中的钢/土壤电位比在透气性好(含氧量高)的土壤中要低些。实际上,良好的透气性和高的电阻率常相当于低的湿度,反之亦然。这样对于大直径的地下管道,与管顶相接触的土壤可能较干和透气好,而与管底部相接触的土壤就可能较湿和透气性差。因而在管底部的钢/土壤电位低于管顶部的,在埋管底部的阳极区上能发生腐蚀。如图 1.3.2b 所示。

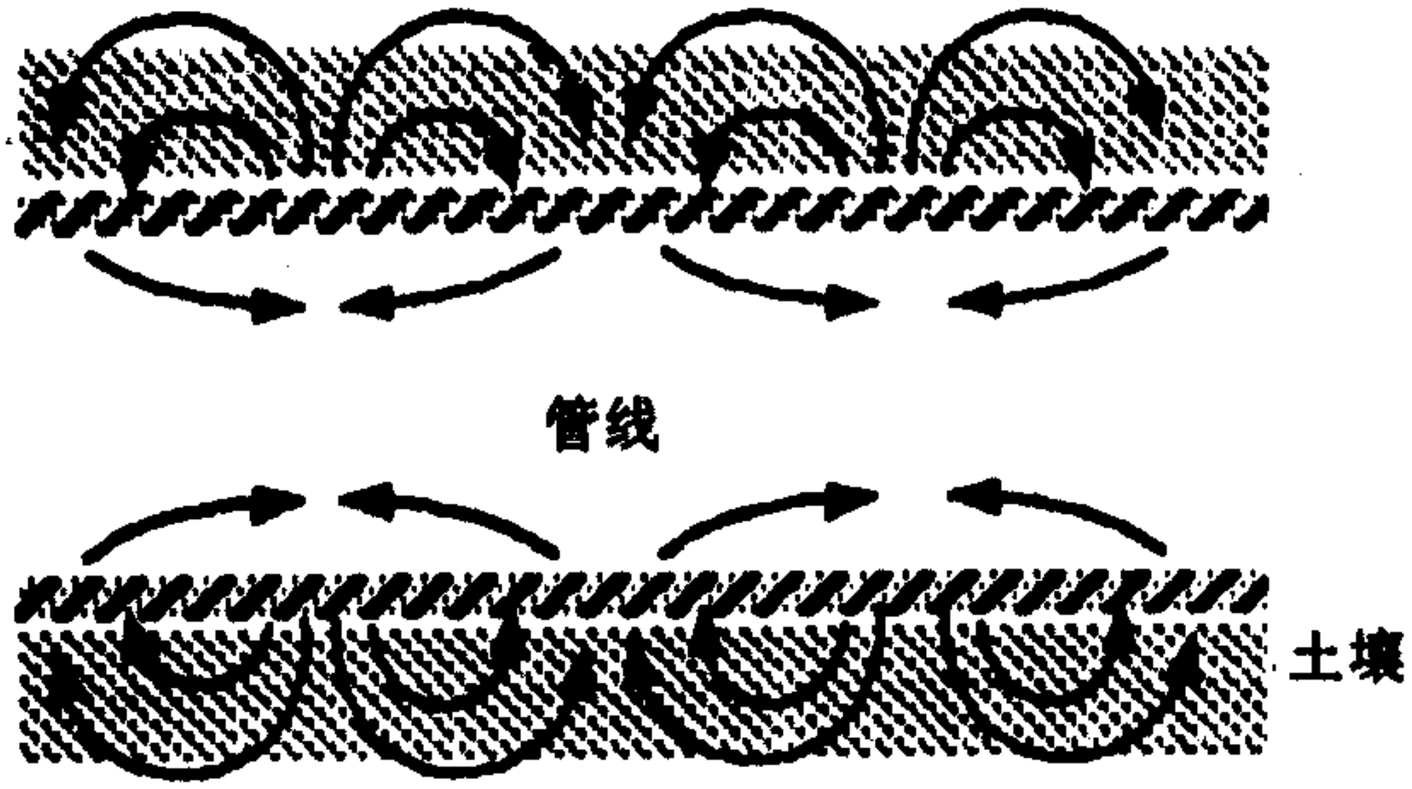


图 1.3.2a 管道经过不同土壤类型引起的腐蚀。在含盐浓度高的土壤中，管道/土壤电位较低，腐蚀最严重。

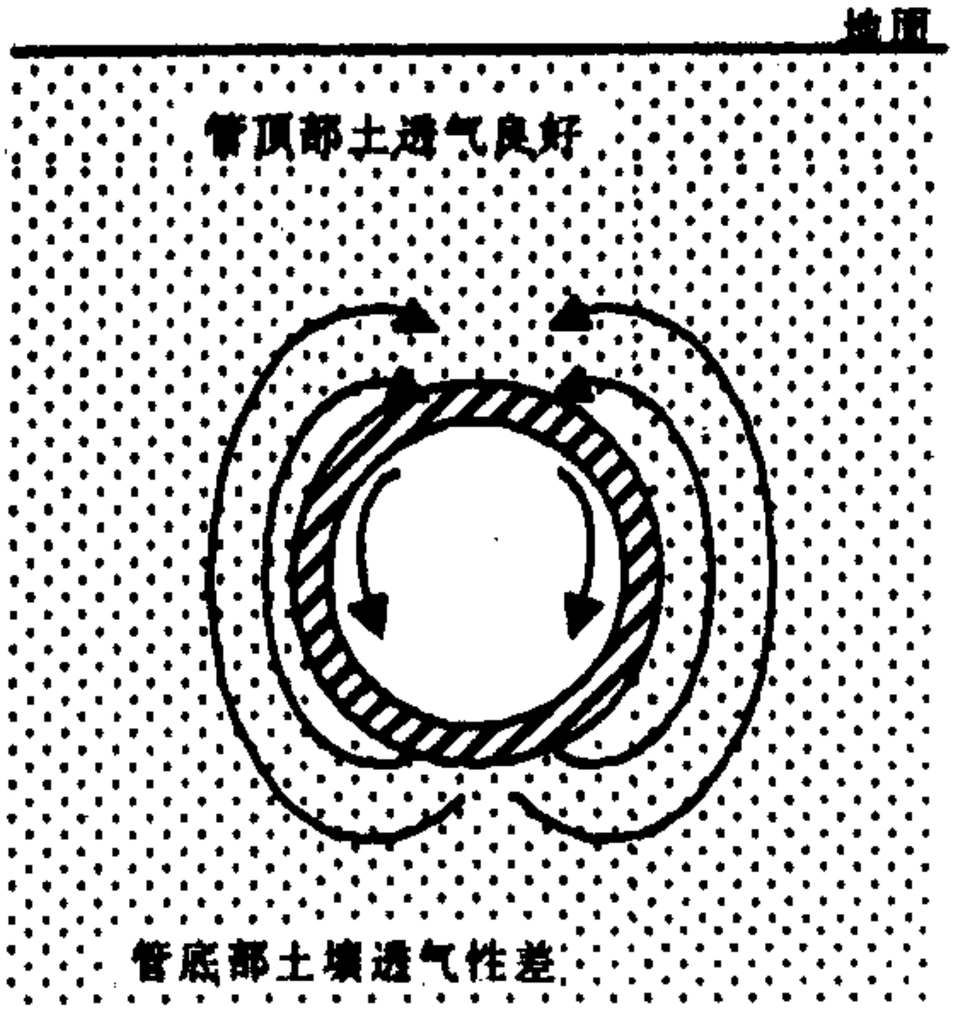


图 1.3.2b 土壤透气性差异在管底引起的腐蚀。管底部的土壤比上部湿、透气性差、氧浓度低，因而管底部的钢/土壤电位低于管顶部的电位，腐蚀最严重。

实践证明：当土壤湿度不同时，两部分地下钢管间的电位差可达0.3伏左右，尤其当各段落的土壤透气性不同时，可能形成较大

的电位差。在这种情况下，所构成的腐蚀电池其二极间的距离比较远，甚至可达几公里，故称宏腐蚀电池，一般认为因土壤透气性不同而形成的宏腐蚀电池是埋地金属管道发生剧烈腐蚀的主要原因。常见的土壤透气性不均匀的状况包括：管道穿越河流、铁路、公路，管道穿越地形起伏地区、管道从城市郊区通过等。

一般情况下，地下金属管道同时存在着上述两种腐蚀电池的破坏作用。

2、杂散电流腐蚀

由于土壤中有杂散电流，对绝缘不良的管道，杂散电流可以在绝缘损坏的某一点上流入管道，沿管道流动，然后在绝缘破坏的某一点上离开管道，流回杂散电流源。如图 1.3.3 所示，电流由电车轨道泄漏出来，在 x 处流入管道，然后沿管道流到 y 处，再从该处返回电源，在 y 处发生腐蚀。

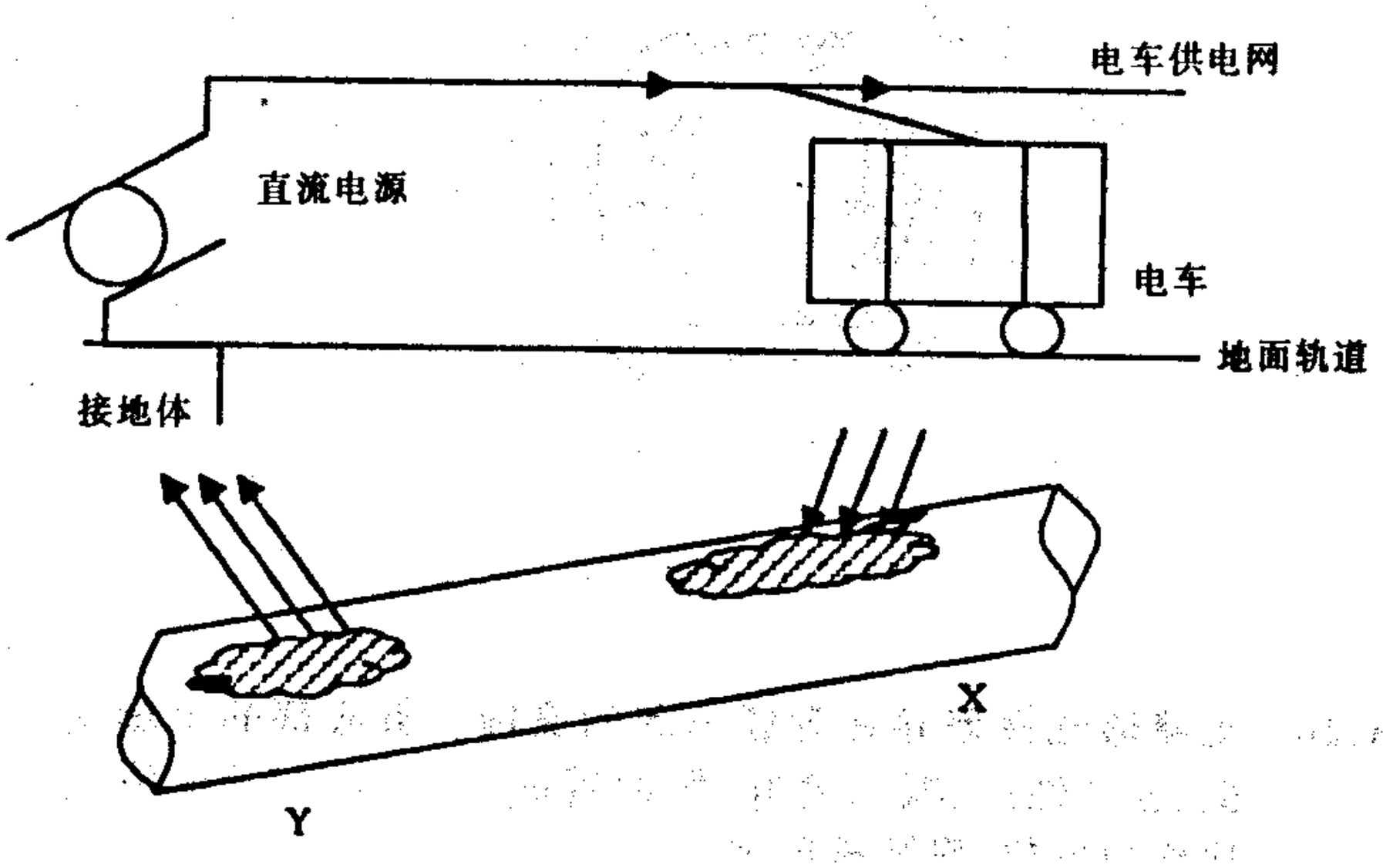


图 1.3.3　杂散电流效应

在这种情况下，管道的阳极部分，即电流离开管道处发生集中腐蚀。实际工程中杂散电流源的形成很多，例如：电气化铁道、电解工厂、高压输配电系统的接地体等等。同样，阴极保护系统发出的强制电流，也可能影响其周围未保护的地下钢结构物，故在设计阴极保护系统时，需要考虑这一因素。

3、微生物腐蚀

据研究，在土壤中大量繁衍的各种微生物，在特定的条件下，参与金属的腐蚀过程，各种类型微生物的主要特性和腐蚀行为是各不相同，以硫酸盐还原细菌最为重要的。在土壤中含有硫酸盐，如在缺氧的条件下，厌氧性细菌——硫酸盐还原菌就会繁殖起来，它的活动对于附近的钢铁构件起着促进腐蚀的作用。

硫酸盐还原菌在生活过程中需要氢或某些还原物质，将硫酸盐还原成硫化物

$$SO_4^{2-} + 8H \rightarrow S^{2-} + 4H_2O$$

而细菌本身就是利用这个反应的能量而繁殖的。

埋藏在土壤中的钢铁构件表面，其腐蚀进行的阴极过程中如有氢气产生，则促进了硫酸盐还原菌的活动，而活动的结果消耗了钢铁表面的氢并加速了细菌本身的繁殖，这样钢铁的腐蚀亦得到加速。

硫酸盐还原后产生的 S^{2-} 离子能与 Fe^{2+} 离子化合生成黑色的 FeS。所以，当有硫酸盐还原菌活动时，在钢铁表面产生的腐蚀产物不是铁锈色，而是黑色的。

微生物在腐蚀过程中所起的作用很复杂且众说纷纭，目前大致可归纳为以下几点：

(1)、细菌将土壤中的某些有机物转化为盐类、酸类等腐蚀介质，并与金属作用而引起腐蚀。

(2)、微生物改善了去极化条件，加快腐蚀速度。

(3)、细菌破坏了管道的防腐绝缘层。