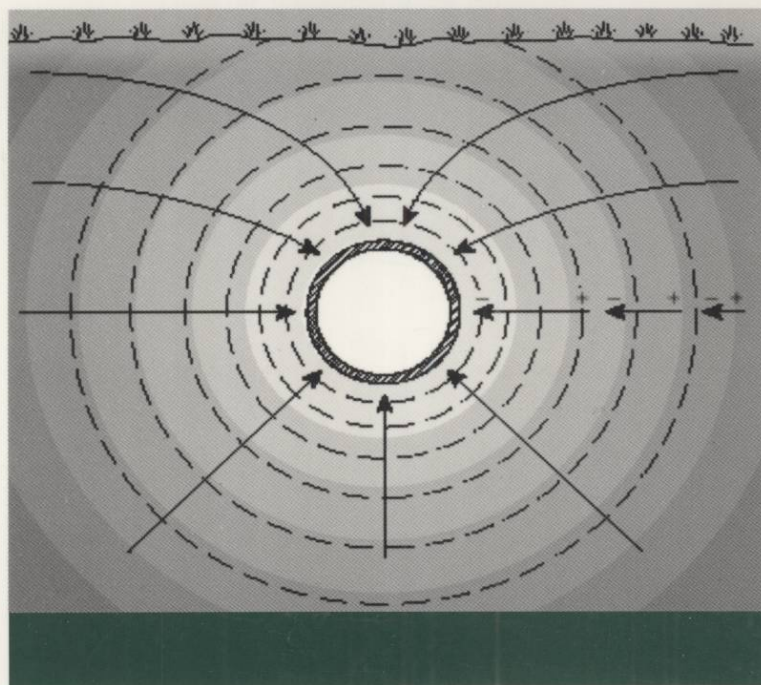


原著 [美] A.W. 皮博迪 主编 [美] R.L. 比安切蒂
翻译 吴建华 许立坤 等

管线腐蚀控制

(原著第二版)



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

Q

5.809

T2055.809
1

管线腐蚀控制

(原著第二版)

原著 [美] A. W. 皮博迪
主编 [美] R. L. 比安切蒂
翻译 吴建华 许立坤 等
审校 侯文泰



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

管线腐蚀控制/[美]皮博迪(Peabody, A. W.)著, [美]比安切蒂(Bianchetti, R. L.)编, 吴建华, 许立坤等译. —北京: 化学工业出版社, 2004. 4

书名原名: Peabody's Control of Pipeline Corrosion, Second Edition
ISBN 7-5025-5310-X/TQ·1947

I. 管… II. ①皮…②比…③吴…④许… III. 化工设备-管线防腐
IV. TQ055. 809

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 020535 号

Peabody's Control of Pipeline Corrosion, Second Edition/A. W. Peabody,
Edited by R. L. Bianchetti
ISBN 1-57590-092-0



Copyright © 1967, 2001 by NACE International. All rights reserved.
Authorized translation from the English language edition published
by NACE International.

本书中文简体字版由 NACE International 授权化学工业出版社出版发行。
未经许可, 不得以任何方式复制和抄袭本书任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2003-0326

管 线 腐 蚀 控 制

(原著第二版)

原著 [美] A. W. 皮博迪
主编 [美] R. L. 比安切蒂
翻译 吴建华 许立坤 等
审校 侯文泰
责任编辑: 段志兵 刘丽宏
责任校对: 王素芹
封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(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
聚鑫印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订
开本 720 毫米×1000 毫米 1/16 印张 21¼ 字数 389 千字
2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-5310-X/TQ·1947
定 价: 45.00 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

英文版序言

本书最早由 Sam Peabody 出版于 1967 年，是管线腐蚀控制和试验领域被使用最频繁和引用最多的文献。在本书第一版出版时，地下管线阴极保护准则仍在评价和讨论当中，直到 1969 年，NACE 才公布了与保护准则相关的一个标准化文件 RP0169。在第一版中 Peabody 所体现的远见和卓识经受住了时间的考验。

与第一版相比，本书的修订版并不打算有本质上的改动，大多数文字和概念仍保持原貌。只是，我们试图结合原版本中的传统内容对设备、试验技术、准则、涂层、腐蚀调查方法和数据分析等进行更新和更为广泛的讨论。

本版本所附的光盘 (CD-ROM)^① 中含有重要的设计计算公式、腐蚀控制设计的案例和修订后的本书的电子版本。这些设计案例提供了如何逐步地设计各种阴极保护系统构成组件的方法。

正像在 1967 年版中序言所描述的，我们努力校核了书中的所有文字叙述和数据的准确性，但错误和不当之处在所难免，敬请读者指正，以便再版时加以修正。

① 化学工业出版社的中文版没有附这份光盘。

译者序

本书原作者 A. W. Peabody 在管线腐蚀控制领域工作 40 余年，是世界著名的管线腐蚀控制专家，尤其在阴极保护领域取得了成效卓著的成就和业绩。（第二版）各章的作者都是管线腐蚀控制方面的工程专家，他们多年来从事该领域的实践工作，取得了令人瞩目的工作进展，这些在本书中均有体现。

本书在内容上包括了管线阴极保护的最新发展，更为可贵的是书中的内容大部分来自作者的实际工作。书中介绍了阴极保护原理，管线涂层及其发展，阴极保护准则，腐蚀调查评价技术及仪器，阴极保护系统的设计、施工、维护，阴极保护电源，管线的微生物腐蚀，管线的杂散电流腐蚀及其防护及腐蚀经济学基础，内容详尽，是一部非常实用的工具书，适合于工程技术人员使用，也可以作为大学生、研究生的教学参考书。

阴极保护是管线腐蚀控制的最有效方法之一，对于管线的安全运行起到重要作用。我国在许多管线上均采用了阴极保护技术，但收到的效果不尽相同，这与前期的腐蚀调查、阴极保护设计、施工、维护和测试相关，这些内容的许多细节在本书中均有体现。

我们希望本书中文版的问世，对我国管线腐蚀控制事业的发展起到促进作用，我们将为此而感到高兴。

本书的序言，第 2、3、11 章，附录 B 由吴建华翻译；第 7、8、9 章由许立坤翻译；第 1、15 章，附录 A 由阎永贵翻译；第 12、14、16 章由刘光洲翻译；第 4、10、13 章由王廷勇翻译，第 5、6 章由赵永韬翻译。吴建华对部分章节进行了校对，侯文泰先生对全书译稿进行了统一审校，吴建华对全书进行了统一校核并定稿。钱建华绘制了全书的图片，并承担了文字整理工作。

由于我们的水平有限，译得不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

吴建华

2003 年 12 月于青岛

作者简介



1915—1998

本书的修订版是美国腐蚀工程师协会（NACE）为纪念其原作者 A. W. (Sam) Peabody 而奉献给读者的一本著作，自从 1967 年出版以来，该书至少被翻译成 7 种文字，并且被大多数人认为是管线腐蚀的权威著作。

Sam 获得缅因大学（University of Maine）学士学位，并在布鲁克林工业学院（Brooklyn Polytechnic Institute）继续其研究生学习。作为腐蚀工程主任，他在 Ebasco 服务公司（Ebasco Services Inc.，已不存在）工作 40 多年，直到 1980 年退休。他在 1947 年就已经是美国腐蚀工程师协会（NACE）的活跃会员了，其成就、获得的奖励和受到的赞誉太多了，在这里不能一一列举。他留给我们最大的遗产是绅士和学者的完美结合，尤其是对于有幸曾为其工作或与其工作过的人来说。他是一位重视专业精神的优秀教师，其优秀品格不胜枚举。

目 录

第 1 章 腐蚀引论 (John A. Beavers)	1
1.1 什么是腐蚀?	1
1.2 如何探测腐蚀?	3
1.3 如何减缓腐蚀?	5
第 2 章 管线涂层 (Richard N. Sloan)	7
2.1 涂层作为腐蚀控制措施的有效性	7
2.2 规范	12
2.3 检验程序	12
2.4 管线涂层的种类	14
2.5 结论	19
参考文献	20
第 3 章 阴极保护的工作原理 (John A. Beavers)	21
3.1 阴极保护的基本理论	21
3.2 阴极保护的实际应用	23
3.2.1 牺牲阳极阴极保护	23
3.2.2 强制电流阴极保护	24
3.2.3 阴极保护准则	24
3.2.4 阴极保护系统的类型、大小和间距的选择	25
3.2.5 涂层对阴极保护的作用	25
3.2.6 涂覆管线的过保护	28
3.2.7 远地床和近地床	28
3.2.8 电屏蔽和阴极保护	32
3.3 阴极保护的作用	38

3.4 阴极保护对其他结构的作用	39
参考文献	46
第4章 阴极保护准则 (John A. Beavers, Kevin C. Garrity)	47
4.1 钢质和铸铁管线系统阴极保护准则	47
4.1.1 通电电位—850mV 准则	48
4.1.2 极化电位—850mV 准则	50
4.1.3 100mV 极化值准则	52
4.1.4 净保护电流准则	56
4.1.5 用于钢及铸铁的其他准则	57
4.2 铝质管线阴极保护准则	59
4.3 铜质管线阴极保护准则	60
4.4 异种金属管线阴极保护准则	60
第5章 调查方法和评价技术 (Ronald L. Bianchetti)	63
5.1 现场调查前数据的收集	63
5.2 常用的调查方法	64
5.3 测量步骤和调查方法	65
5.3.1 电位测量	65
5.3.2 管线电流测量	74
5.3.3 土壤电阻率测量	81
5.3.4 土壤的化学分析	86
5.4 阴极保护电流需要量测试	88
5.5 其他考虑事项	92
5.6 腐蚀调查实例	93
5.7 调查数据的记录	95
第6章 仪器设备 (Mark Lewis)	97
6.1 设备	97
6.2 附件	117
6.3 维护与保养	123
第7章 地床设计 (Ronald L. Bianchetti, Steve McKim)	125
7.1 确定地床的位置	125

7.2	地床设计	126
7.3	分布式阳极系统	139
7.4	深井阳极阴极保护系统的设计与安装	140
7.4.1	定义	140
7.4.2	用途与优点	141
7.4.3	设计时的考虑因素	142
7.4.4	阳极悬挂系统	145
7.4.5	安装时的考虑因素	148
	参考文献	151
第 8 章	强制电流阴极保护 (Ronald L. Bianchetti)	153
8.1	整流器的类型	153
8.2	整流器大小的选择	157
8.3	整流器的规格	158
8.4	整流器的效率	159
8.5	整流器的安装	161
8.6	强制电流系统用地床材料	162
第 9 章	牺牲阳极阴极保护 (Ronald L. Bianchetti)	175
9.1	管线用牺牲阳极的类型	175
9.2	牺牲阳极的工作原理	175
9.3	牺牲阳极的应用	177
9.4	镁阳极和锌阳极的特性	178
9.5	阳极填料	183
9.6	阳极寿命的计算	184
9.7	设计的考虑因素	185
9.8	阳极使用性能	188
9.9	牺牲阳极安装方法	191
第 10 章	阴极保护用其他电源 (John A. Beavers)	199
10.1	发动机-发电机	199
10.2	汽轮发电机	200
10.3	热电发生器	202
10.4	太阳能电力系统	204
10.5	电池	205

10.6	风力发电机.....	205
10.7	燃气轮机.....	206
10.8	燃料电池.....	207
第 11 章	杂散电流腐蚀 (Michael J. Szeliga)	209
11.1	来自阴极保护装置的杂散电流.....	210
11.1.1	干扰的测试.....	211
11.1.2	如何减小杂散电流干扰.....	216
11.2	来自运输系统或采矿系统的杂散电流.....	223
11.2.1	暴露区的测试.....	225
11.2.2	纠正措施.....	228
	参考文献.....	233
第 12 章	施工 (Ronald L. Bianchetti)	235
12.1	管线涂层.....	235
12.2	测试桩的安装.....	237
12.3	套管穿越的安装与测试.....	242
12.4	绝缘接头.....	246
12.5	牺牲阳极的安装.....	251
12.6	阴极保护系统的安装.....	252
12.7	检验.....	254
第 13 章	维护程序 (Ronald L. Bianchetti)	257
13.1	维护程序的要求.....	257
13.2	定期检查.....	258
13.3	计算机程序.....	261
13.4	涂层的维护.....	261
13.5	整流器的维护.....	262
13.6	地床的维护.....	264
13.7	牺牲阳极的维护.....	265
13.8	测试点的维护.....	265
13.9	穿越套管的维护.....	266
13.10	外部管线交叉处的维护	267

第 14 章 微生物腐蚀 (Brenda J. Little, Patricia Wagner)	269
14.1 概述	269
14.2 微生物腐蚀的机制	271
14.3 管线上的微生物腐蚀	276
参考文献	279
第 15 章 经济性 (Ronald L. Bianchetti)	281
15.1 经济比较	281
15.2 费用比较的例子	283
15.2.1 阴极保护系统可选方案的比较	283
15.2.2 泄露费用和阴极保护费用的比较	285
15.2.3 阴极保护与管线腐蚀裕量比较	287
15.2.4 地床电缆的规格和阳极间距	288
15.2.5 阳极的间距	288
15.3 良好维护的经济性	289
15.4 涂层的经济性	290
第 16 章 腐蚀的基本理论 (John A. Beavers)	291
16.1 热力学	291
16.2 动力学	298
16.3 阴极保护	307
16.4 环境极化	307
附录 A NACE 腐蚀术语	309
附录 B 地下管线腐蚀控制的其他重要信息	323
附录 C 常用单位换算表	327

第 1 章

腐 蚀 引 论

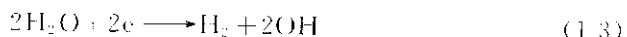
John A. Beavers

1.1 什么是腐蚀？

腐蚀的一个广义定义是材料与环境相互作用而导致的失效。这个定义包含所有的天然和人造材料，包括塑料、陶瓷和金属。本书侧重于金属的腐蚀，重点放在埋地管线用碳钢和低合金钢的腐蚀。腐蚀的定义引出的问题是，金属为什么会发生腐蚀？这需要用热力学的知识来解释，它可以给出一个过程（如腐蚀）是否发生；引出的第二个问题是腐蚀速率是多少或管线能维持多久？腐蚀动力学可以回答这个问题。这两个问题在第 16 章进行详细讨论。本章主要介绍金属的地下腐蚀问题。在本书的附录 A 中列出相关的名词术语，以便辨别易混淆的名词术语。

金属从矿石中提炼出来时，需要提供很大的能量，使其处于一个高能级状态。这些矿石是典型的金属氧化物，如用来炼钢的赤铁矿 (Fe_2O_3)，炼铝的铝土矿 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)。热力学的一个规律是材料总是趋向于最低能量状态存在。换句话说，大多数金属处于热力学不稳定状态，具有寻求低能量状态的倾向，如氧化物或其他化合物。金属转化成低能量氧化物的过程称为腐蚀。

在常温下,大多数通用工程材料的腐蚀发生在水(含水)环境,从性质上说是一个电化学过程。水环境指电解质溶液,对于地下腐蚀的情况,指的是潮湿的土壤。腐蚀过程包括金属丢失电子(氧化)[式(1-1)]和消耗这些电子的还原反应(如氧、水的还原)[式(1-2)和式(1-3)]:



通常,氧化反应称为阳极反应,还原反应称为阴极反应。腐蚀发生时必须同时进行上述两个电化学反应。氧化反应导致金属损失,而还原反应必须同时发生以消耗氧化反应所释放的电子,以保持电中性。否则,如在金属和电解质溶液的界面堆积大量的负电荷,腐蚀过程就会停止。

有时也将氧化反应或还原反应被称作半电池反应,它们可以在局部同时发生(在金属的同一区域),也可在不同区域进行。当电化学反应在不同区域进行时,这个过程称作差异腐蚀电池,差异腐蚀电池的示意图见图1-1。金属被氧化的区域称为阳极或阳极区。在这一区

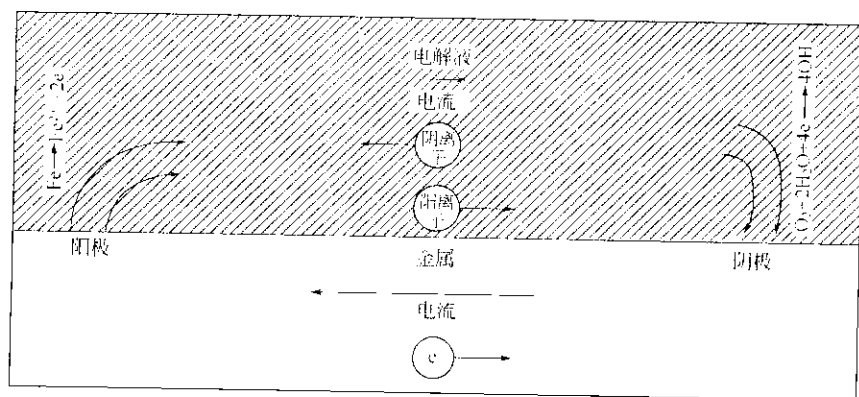


图1-1 腐蚀微电池示意图

域,电流(定义为正电荷流向)从金属的表面流向电解质溶液,同时金属离子离开表面,这一电流通过电解质溶液流向氧、水或其他物质被还原的区域,这个区域称作阴极或阴极区。差异腐蚀电池由四个必须部分组成:

- ① 阳极;
- ② 阴极;

③ 用于连接阳极和阴极的导电金属通道（通常是管线本身）；

④ 阳极和阴极必须所处的导电的电解质溶液（通常是潮湿的土壤）。

管线和其他地下结构的腐蚀来自于差异腐蚀电池。差异腐蚀电池有多种不同的类型，它包括管线因处于氧浓度不同的土壤中而形成的氧浓差电池和管线表面性质或土壤的化学成分不同形成的电池。电偶腐蚀是差异腐蚀电池的类型之一，它是由处于腐蚀环境中的不同金属电耦合形成的。差异腐蚀电池将在第 16 章详细讨论。

1.2 如何探测腐蚀？

腐蚀过程的电化学特征使得检测和减缓埋地结构的腐蚀成为可能，我们可以检测腐蚀过程伴随的电压和电流。

当一块金属置于电解质溶液中，如土壤，由于腐蚀过程的电化学特征，在金属和电解质溶液的界面产生一个电位差。这个电位差不能直接测量，但是可以用电压表来测量土壤中两种不同金属之间的电位差，也可以用电压表来测量金属（通常称为半电池电极）和参比电极之间的电位差，这个电位差通常称为腐蚀电位、开路电位或金属在所测环境中的自腐蚀电位。在土壤环境中，通常使用的是铜/饱和硫酸铜参比电极（CSE）。

电位的测量可用于估计不同金属在一定环境中的相对耐蚀性。惰性金属如金、铂，电位比较正，比很多通用的工程材料如钢、铝更耐腐蚀。按照金属或合金在一定环境中的腐蚀电位进行排序，可列出它们的电偶序。表 1-1 给出了金属和其他材料在中性土壤和水中的电偶序。表中的数据表明碳的电位最正，镁的电位最负。电偶序中对不同金属测得的电位，有时会有所变化，这主要依赖于环境的特性，但在自然环境中如土壤或海水，金属在电偶序中的相对位置基本类似。

腐蚀电位测量的另外一个用途是判断电偶腐蚀发生的可能性。当同一环境中两块金属电连接后，电偶对中电位较负的金属成为差异腐蚀电池的阳极，电位较正的金属成为阴极。通常组成电偶对的两种金属的电位差愈大，电偶腐蚀愈严重，但并非所有情况绝对如此。表 1-1 中的电位序表明，在土壤中将铜与低碳钢电连接，铜将成为阴极，而钢则成为阳极而被加速腐蚀。电偶腐蚀将在第 16 章中进一步讨论。

表 1-1 材料在中性土壤和水中的实际电位序

材 料	电位 (CSE), V
碳、石墨、焦炭	-0.3
铂	0~0.1
钢表面的氧化皮	0.2
高硅铸铁	0.2
铜、黄铜、青铜	-0.2
混凝土中的低碳钢	0.2
铅	0.3
铸铁(未石墨化)	-0.5
低碳钢(生锈)	0.2~0.5
低碳钢(洁净、抛光)	0.5~0.8
商业纯铝	-0.8
铝合金(含 5% 的锌)	1.05
锌	1.1
镁合金(含 6% Al, 3% 锌, 0.15% 锰)	-1.6
商业纯镁	1.75

表 1-1 还表明, 低碳钢的电位随表面洁净度或覆盖的氧化皮的不同而有所区别。钢的电位也是土壤性质的函数, 土壤性质包括 pH 值、离子浓度、氧、湿度等。因这些参数的不同而导致地下管线和其他构筑物各处电位不同, 导致严重腐蚀。这种差异腐蚀电池将在第 16 章进一步讨论。

通常用电位测量来检测埋地管线上是否存在上述类型的差异腐蚀电池。将管线电连接, 可以测量管线相对于管线正上方的参比电极的电位, 测量的示意图见图 1-2。一般将参比电极连接于数字电压表的负端来获得负读数。如表 1-1 所示, 在土壤中大多数金属的电位是负值。通过这种测量, 可以认为, 电位相对较负的区域为阳极, 因形成差异腐蚀电池而遭受加速腐蚀。

如果阴极和阳极比较大, 也可通过电流测量来检测差异腐蚀电池。这些大电池可以产生长距离电流, 通过测量, 在管线和其他构筑物上可以检测到这种电流。根据欧姆定律 ($V=IR$, V 为电压, I 为电流, R 为电阻) 可知, 电流流过土壤会产生电位梯度, 它可以通过在管线上方垂直放置相同的参比电极测量其电位差而检测到。可以用

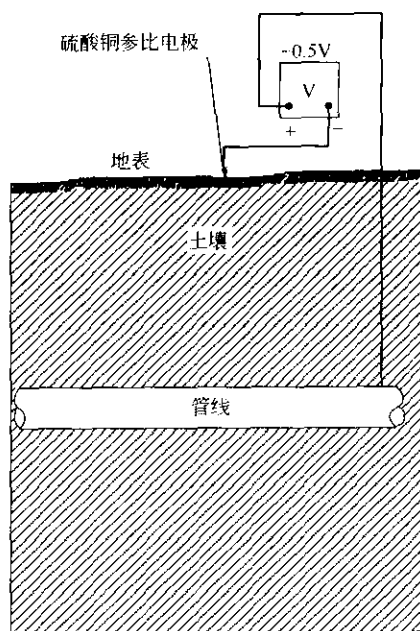


图 1-2 管-地电位测量示意图

这一电位测量来显示差异电池电流的方向。沿着管线进行一系列的电位测量，可以确定阳极位置和阴极位置。另一个可能的电流源是杂散电流，第5章将对此进行进一步讨论。

1.3 如何减缓腐蚀？

减缓地下管线的腐蚀的主要方法是涂层和阴极保护。这两种方法将在以后章节中分别进行详细讨论，这里仅做简单说明。

涂层一般是电绝缘材料，通常它在金属表面形成一层连续的膜而起到保护作用。涂层的作用是将金属与周围的电解质溶液隔离（防止电解质溶液与金属接触），使两者之间增加一个很高的电阻，从而阻止电化学反应的发生。实际上，不管质量如何，所有涂层都存在漏点即缺陷，它是在涂覆、运输和安装预制管线过程中形成的。服役过程中涂层的老化、土壤的应力、管线在地下的移动也会造成涂层缺陷。服役过程中涂层的老化还会导致其从金属表面剥离，严重的将金属暴露于地下环境。即使管线表面绝大多数可以得到保护，由于缺陷或剥离处有较高的腐蚀速率，也会导致管线泄露和破裂。因此，在无阴极

保护的情况下，涂层很少单独用于埋地管线。在施加阴极保护的管线上，涂层的功能是减小金属管线裸露的面积，从而减少阴极保护所需要的电流。第 2 章将详细讨论涂层。

阴极保护的定义是使金属表面成为电化学电池的阴极而减缓金属表面腐蚀速率的技术。它可运用外部电源（指强制电流阴极保护）或牺牲阳极，使金属的电位向负方向偏移来实现。强制电流系统是通过电源和埋地阳极将电流施加到被保护结构上，如用整流器输出电流；牺牲阳极系统是利用牺牲阳极如锌、镁与管线钢的电偶效应提供阴极保护所需要的电流。阴极保护技术将在第 3 章和第 16 章详细讨论。