

THEORY AND CONTROLLING OF GALVANIC CORROSION BETWEEN METALS AND COAL

中国矿业大学学术丛书

金属 / 煤接触腐蚀 理论及其控制

孙 智 著



CHINA UNIVERSITY OF MINING & TECHNOLOGY PRESS 中国矿业大学出版社

中国矿业大学学术丛书

金属/煤接触腐蚀理论及其控制

〔煤炭科学基金(94 机 10103)部分资助项目〕

孙 智 著

中国矿业大学出版社

内容摘要

本书比较全面系统地介绍了金属/煤接触腐蚀的理论及其控制的研究进展。在采用电化学极化、失重试验和 SEM、X 射线衍射分析的实验结果的基础上,总结分析了金属/煤接触腐蚀的动力学、电化学过程和腐蚀形态特征,分析了煤的物化性质对金属腐蚀的作用规律,研究了几种控制金属/煤腐蚀的方法及其耐蚀机理。

本书可供腐蚀与防护方向的研究生、教师和煤矿金属腐蚀与防护设计研究人员参考。

责任编辑 姜志方

责任校对 杜锦芝

图书在版编目(CIP)数据

金属/煤接触腐蚀理论及其控制/孙智著. — 徐州:
中国矿业大学出版社, 2000. 10

ISBN 7 - 81070 - 258 - 0

I. 金… II. 孙… III. 金属-接触腐蚀, 煤-研究
IV. TG172. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 55871 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

中国矿业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 850×1168 1/32 印张 7.5 字数 200 千字

2000 年 10 月第 1 版 2000 年 10 月第 1 次印刷

印数 1~800 册 定价 20.50 元

前 言

腐蚀是一个古老的话题。人类自从学会使用金属材料,便开始了与自然界中存在的各种腐蚀的抗争。然而,一直到今天,腐蚀仍是困扰人类的一个大问题。今天,世界上每年因腐蚀报废的钢铁约为全年钢产量的 $1/3$,其中约有占总产量 $1/10$ 的钢铁因腐蚀而无法回收,仅中国1998年因腐蚀造成的经济损失就高达2800亿元。专家估计,如能采取正确的腐蚀防护措施,这一损失至少可降低 $25\% \sim 30\%$ 。而由于腐蚀导致的设备损坏,由此引起事故造成的损失则无法估量,甚至可能造成严重灾难。为此,各国科技工作者倾注了大量心血,致力于攻克金属腐蚀这一制约人类进步的顽疾。由于我国广大科技工作者的不懈努力,在国家经济建设的各个行业部门都取得了腐蚀控制的巨大成就。但是,还是有一些特殊的腐蚀问题没有得到解决,如煤矿井下金属的特殊腐蚀现象就在很长时间内困扰着煤矿机械工程师们。在中国矿业大学多位教授的指导下,作者从1990年开始对煤矿井下金属腐蚀的特殊现象进行研究,在采用电化学极化、失重试验和SEM、X射线衍射分析的实验结果的基础上,总结分析了金属/煤接触腐蚀的动力学、电化学过程和腐蚀形态特征,分析了煤的物化性质对金属腐蚀的作用规律,得出了一些煤矿井下金属异常腐蚀的规律,提出了金属/煤接触腐蚀的概念,建立了金属/煤接触腐蚀效应与煤化度的对应关系,并对控制这一特殊腐蚀的方法和效果进行了实验分析。本书就是在总结近十年工作的基础上并参考了许多国内外学者的研究成果而写成的。

阅 76/03

前 言

作者在此对在研究工作中给予了悉心指导的张永忠、倪振尧、朱敦伦教授表示衷心的感谢;在研究开始阶段,中国腐蚀与防护学会能源专业委员会主委、清华大学陈鹤鸣教授和中国矿业大学的李昌熙教授、杨志伊教授给予了大力支持并对研究计划提出了中肯的建议,在此向各位关心这一工作和作者本人的各位教授表示诚挚的感谢;在研究工作中还得到了多位作者的同事和分析单位同仁的无私帮助和支持,以及有多名学生参与了实验工作,在此恕不一一列出,深表谢忱。

在写作本书时参考了许多国内外学者的著作,在此向各位专家表示深深的感谢和敬意。

本书的部分工作得到煤炭科学基金(94 机 10103)资助。

本书的出版一直得到中国矿业大学机电与材料工程学院院长段雄教授的支持与帮助,作者深感荣幸。

由于作者水平有限,加之研究时间较短,书中定有许多不当之处,敬请读者批评指正。

孙 智

2000 年 5 月 6 日

THE THEORY AND CONTROLLING OF GALVANIC CORROSION BETWEEN METALS AND COAL

SUN Zhi

ABSTRACT

The weight loss ratios of metals, electrode polarization curves and variation of corrosion current and potential were studied under a variety of experimental conditions. The coals, corrosion feature and corrosion deposits of metal surface were analyzed. The controlled methods to abnormal corrosion of metal underground were developed. The results show that in the neutral electricity medium solution the coal has a distinct effect on the corrosion of metal contacted with the coal. The corrosion rate of metal increases as rise of coalification of coal in the same other cases. The corrosion rate of plain carbon steel contacted with higher coalification such as anthracite coal is 2 to 3 times larger than that in brown coal (with lower coalification). The corrosion behavior of metal uncontacted with coal in mine—water is controlled by dissolved oxygen and the other ions while the coal produces little influence. The mechanism of action of coal on metal corrosion was discussed and the basic theory and conditions of metal corrosion caused by coal and its protection was put forward.

KEY WORDS: corrosion, coal, coalification, galvanic corrosion, depolarization, corrosion controlling

目 录

1 引言	(1)
1.1 金属的腐蚀	(1)
1.2 金属腐蚀科学的发展与研究的意义	(1)
1.3 煤炭工业金属腐蚀研究的意义	(3)
1.3.1 煤炭工业金属腐蚀研究的现状	(3)
1.3.2 煤炭工业金属腐蚀研究的意义	(5)
1.4 煤炭工业金属腐蚀的形式	(6)
1.4.1 金属腐蚀的分类	(6)
1.4.2 煤炭领域金属腐蚀的形态	(7)
2 金属/煤接触腐蚀电化学基础	(9)
2.1 电极过程与腐蚀电池	(10)
2.1.1 电极过程与电极电位	(10)
2.1.2 腐蚀电池	(16)
2.2 电位—pH 图	(19)
2.2.1 电位—pH 图基本原理	(19)
2.2.2 H_2O 的电位—pH 图	(22)
2.2.3 电位—pH 图的建立	(24)
2.2.4 电位—pH 图的应用	(28)
2.3 极化与极化分析	(31)
2.3.1 极化现象	(31)
2.3.2 极化的产生与去极化	(34)

目 录

2.3.3	极化曲线	(39)
2.3.4	腐蚀极化图及其应用	(41)
2.4	析氢腐蚀与吸氧腐蚀	(43)
2.4.1	析氢腐蚀	(43)
2.4.2	吸氧腐蚀	(46)
2.5	接触腐蚀	(51)
2.5.1	接触腐蚀的定义	(51)
2.5.2	接触腐蚀效应	(52)
2.5.3	金属电偶序	(55)
2.5.4	影响接触腐蚀的因素	(55)
3	金属/煤接触腐蚀实验研究方法	(60)
3.1	电化学腐蚀实验研究方法概述	(60)
3.1.1	腐蚀速率的确定	(60)
3.1.2	极化测试方法	(63)
3.2	腐蚀实验研究方法进展	(65)
3.2.1	现代物理研究方法在腐蚀科学中的应用	(65)
3.2.2	计算机技术在腐蚀科学与防护技术 研究中的应用	(74)
3.3	金属/煤接触腐蚀研究的实验条件与方法	(79)
3.3.1	腐蚀失重试验	(79)
3.3.2	电化学极化测试	(82)
3.3.3	腐蚀形态与产物分析	(84)
4	金属/煤接触腐蚀动力学分析	(85)
4.1	金属/煤接触腐蚀速率	(85)
4.1.1	煤和煤水中煤对碳钢腐蚀的影响	(85)
4.1.2	不同粒径煤中碳钢的腐蚀率	(88)
4.1.3	纯铜在煤中的腐蚀	(89)
4.1.4	Ni—Cr 不锈钢在煤中的腐蚀	(91)

目 录

4.1.5	讨论	(91)
4.1.6	小结	(93)
4.2	金属/煤接触腐蚀电化学分析	(94)
4.2.1	相对电极电位	(94)
4.2.2	实测的短路电流	(95)
4.2.3	腐蚀电流与电位的变化	(96)
4.2.4	金属在煤水中的电化学极化行为	(100)
4.2.5	小结	(108)
4.3	腐蚀表面形态与产物分析	(109)
4.3.1	试样表面形态变化的观察结果	(109)
4.3.2	腐蚀试样表面的微观形态分析	(113)
4.3.3	金属腐蚀产物分析	(123)
4.3.4	小结	(128)
5	金属/煤接触腐蚀机理	(130)
5.1	金属/煤接触腐蚀的电化学过程	(130)
5.1.1	煤中金属腐蚀的电化学过程	(130)
5.1.2	煤中金属腐蚀的速度控制步骤	(132)
5.2	金属/煤接触腐蚀过程中煤的作用	(134)
5.2.1	M、N 煤的接触腐蚀作用	(134)
5.2.2	煤对金属腐蚀作用的特点	(136)
5.3	金属/煤接触腐蚀动力学分析	(141)
5.3.1	接触腐蚀及其驱动力	(141)
5.3.2	金属与煤接触腐蚀极化分析	(143)
5.4	小结	(144)
6	金属/煤接触腐蚀控制	(146)
6.1	金属腐蚀表面防护方法概述	(146)
6.1.1	金属防护涂(镀)层技术	(146)
6.1.2	表面热处理	(149)

目 录

6.1.3	新型表面改性技术	(157)
6.2	热喷涂铝防护涂层及其耐蚀性	(161)
6.2.1	热喷涂特点及应用领域	(161)
6.2.2	热喷涂技术发展概况	(164)
6.2.3	电弧喷涂	(166)
6.2.4	电弧喷涂 Al 涂层/煤接触腐蚀及其耐蚀性 实验	(173)
6.2.5	电弧喷涂涂层/煤接触腐蚀作用机理	(183)
6.2.6	电弧喷涂涂层/煤接触腐蚀作用特性	(186)
6.3	盐浴复合处理涂层在煤及煤水中的耐蚀性	(187)
6.3.1	盐浴复合处理基本原理及参数	(187)
6.3.2	盐浴复合处理层在煤及煤水中腐蚀行为 实验方法	(189)
6.3.3	复合处理层在煤及煤水中的耐蚀性	(190)
6.3.4	复合处理层在煤及煤水中的极化行为	(191)
6.3.5	复合处理层的耐蚀性机理及煤的作用	(194)
6.4	电化学阴极保护的可行性分析	(196)
6.4.1	阴极保护的基本理论	(196)
6.4.2	阴极保护的基本参数	(198)
6.4.3	阴极保护用的阳极材料	(200)
6.4.4	外加电流阴极保护系统的设计	(200)
6.4.5	阴极保护的应用	(207)
6.5	金属/煤接触腐蚀中阴极保护的可行性	(209)
6.5.1	阴极保护参数的选择	(209)
6.5.2	阴极保护效果	(209)
7	本书的部分结论	(212)
	参考文献	(216)

1 引 言

1.1 金属的腐蚀^[1~11]

金属腐蚀有多种定义方法,通常的定义为:金属与环境介质发生化学或电化学反应,导致金属的损坏或变质。或者说在一定环境中,金属表面或界面上进行的化学或电化学反应,结果使金属转入氧化或离子状态。这些多相反应就是金属腐蚀研究的对象,金属腐蚀学科是在金属学、金属物理、物理化学、电化学和力学等学科基础上发展起来的一门交叉学科。

腐蚀与断裂、磨损是金属损伤的最重要形式。与金属构件的断裂不同,金属的腐蚀和磨损是一个渐进的过程,而且在很多情况下,两者通常是相互作用,导致金属构件的早期失效;同时,腐蚀可为金属构件的断裂提供条件,甚至直接导致断裂的发生。在现代工程结构中,特别在高温、高压、高质流作用下,金属腐蚀造成的危害尤其严重,因此,金属腐蚀引起人们的特殊关注,研究金属腐蚀已成为当今材料科学与工程不可忽视的内容,在研究金属材料的任何性能时,都必须考虑腐蚀的作用。

1.2 金属腐蚀科学的发展与研究的意义^[3~12]

腐蚀,是一个古老的话题,而人们对腐蚀的关注与防治,则可以追溯到人类的原始活动时期。自从人类有目的地使用金属以来,这个话题就一直困扰着那些金属制品的制造者和使用者,也一直

在激励着人们去克服和防止腐蚀的发生。古希腊的历史学家希洛多脱斯(Xerodtus)和古罗马的自然科学家泼利尼乌斯(Plinius)早在公元前就提出了用锡来防止铁的腐蚀,我国商代就出现了耐蚀性的锡青铜。从已经挖掘出的春秋战国时期的兵器、秦始皇时代的青铜剑和大量剑簇可以发现,当时人们就已经在利用表面处理的技术来提高金属的耐蚀性。但有目的地对金属腐蚀的研究则是在很久以后才形成的。16世纪中叶,俄国科学家罗蒙诺索夫研究了金属的高温氧化机理和金属的溶解及钝化问题。1830~1840年间电离理论以及法拉第(Faraday)定律的出现对腐蚀电化学理论的发展起了重要的作用。1830年德·拉·李夫(De. La. Rive)明确提出了腐蚀的电化学特征(微电池理论)。此后能斯特定律、热力学腐蚀图(E -pH图)等相继诞生,并创立了电极过程动力学理论。到20世纪初,金属腐蚀逐渐发展成为一门独立的学科,经许多著名的电化学、金属学等科学家的共同努力,确立了腐蚀历程的基本电化学规律,使腐蚀科学和防护技术得以迅速发展。特别值得提出的是英国科学家、现代腐蚀科学的奠基人伊文思(U. R. Evans)及其同事们的卓越贡献。

我国的腐蚀科学与防护技术在新中国成立后得到了迅速发展,尤其是改革开放以来,成立了中国腐蚀与防护学会,统一规划和指导全国的腐蚀科学和防护技术的研究。由于我国科技工作者的努力,在石油、天然气开发、石油化工、化学工业、船舶、航空航天、核能等领域的腐蚀与防护工作已取得很大成效,在高温氧化、腐蚀电化学、耐蚀合金及非金属材料 and 防护技术方面取得了大量成果。

腐蚀反应普遍存在,除金以外的所有金属对氧和水在热力学上都是不稳定的,金属材料在绝大多数情况下与介质接触而被腐蚀。据统计,世界上每年因腐蚀报废的钢铁约为全年钢产量的 $1/3$,其中约有占总产量 $1/10$ 的钢铁因腐蚀而无法回收,仅中国1998

年因腐蚀造成的经济损失就高达 2 800 亿元人民币。专家估计,如能采取正确的腐蚀防护措施,这一损失至少可降低 25%。而由于腐蚀导致的设备损坏,以及由此引发的事故造成的损失则无法估量^[13]。

由于腐蚀问题不能解决,由此影响或制约了科学研究的进步和国民经济的发展的事例也是很多的。例如,熔盐反应堆在理论上具有一系列优点,美国早在 1947 年就开始研究,随后还建立了试验堆,但由于裂变产物对主要结构材料的腐蚀引起裂缝等问题难以解决,用了近 30 年时间和大量人力物力,于 1976 年被迫停止了研究^[11]。

金属腐蚀造成的损失和危害如此巨大,以至有时被称作“腐蚀灾难”。因此世界各国对金属腐蚀与防护研究都非常重视^[10,11,14,15]。

1.3 煤炭工业金属腐蚀研究的意义

1.3.1 煤炭工业金属腐蚀研究的现状

1. 国内煤炭工业金属腐蚀研究现状

与其他工业领域相比,煤炭工业环境中的金属腐蚀的研究还有多的空白^[15]。

随着煤炭工业的发展,金属材料的使用量迅速增加,部分矿井开始采取防护措施,也不过是涂沥青和刷漆之类。直到 1981 年原煤炭部组织对 140 个矿井井筒装备腐蚀与防护的状况进行调查,43% 的井筒装备完全没有采取防护措施,已采取的防护措施也全为涂红丹、沥青等比较初级的方法^[17]。

从 80 年代初,原煤炭工业部开始组织煤炭工业有关研究院(所)、高等学校开展有目的的煤矿金属腐蚀与防护的调研工作。在 80 年代中期,成立了中国腐蚀与防护学会煤炭工业学科组,对煤

炭工业金属腐蚀与防护的工作进行有目的的组织与指导,并逐步取得了一些研究成果,发表了有关的研究报告和著作^[16~22],尤其在矿井井筒的防护方面成果较大^[19],如江苏煤研所腐蚀与防护研究室研究开发的各种防护涂料和工艺、中国矿业大学大正表面技术公司研究开发的热喷涂金属防腐蚀技术,均取得良好效果;各矿务局也开始重视这一问题,在北京、兖州、平顶山等矿务局都取得较大经济效益。

2. 国外煤炭工业金属腐蚀研究的发展

国外在这方面的工作起步较国内早,研究工作也进行得比较细致。50年代到80年代对水煤浆的腐蚀问题进行了系统研究^[23,24,25];70年代英国煤管局组织了煤矿金属的腐蚀与防护状况调查,推动了煤矿的腐蚀与防护研究工作^[26,27];南非在70年代就开发了煤矿专用耐蚀钢SR13^[28],较系统地研究了各种煤矿(包括其他类矿井)井下金属的腐蚀现象和防护的方向^[27~34]。到近期,研究工作引进了腐蚀防护研究的最新成果,取得了较大进展。在岩体支护材料的腐蚀与防护^[35,36],含有金属Fe离子等的酸性环境矿井中的腐蚀^[37],井下和煤炭转化预制工段金属腐蚀和磨损腐蚀^[38],并进一步讨论了在这种环境条件下Cl⁻离子等对导致金属腐蚀和磨蚀的作用^[39]。在这些研究中,矿区及其井下金属管道的腐蚀和防护问题得到了特别重视,不仅系统研究了井下金属管道的腐蚀,而且试验了各种耐蚀涂层技术的耐蚀效果^[40~43],总体研究思路和得到的结果基本与其他环境的腐蚀与防护相类似。研究结果大致可以概括为:井下含有丰富的氧,这给金属的氧腐蚀提供了充分的条件。富氧的煤层和氧含量相对较低的区域金属的腐蚀有所不同。矿井水中的介质含有大量的复杂的侵蚀性成分,加速了金属的腐蚀^[44],在腐蚀机理的研究方面突破不大,但在腐蚀防护方面取得了较大进展。另外,在煤炭地下气化过程^[45]、井下微生物腐蚀^[46]方面也做了很多工作。同时,应用腐蚀模型预设设在矿床中

的金属防护方法^[47]也得到了应用。但与同期的其他领域的金属腐蚀与防护研究状况相比,还有一定差距。

3. 我们的差距

我国煤炭工业的金属腐蚀与防护研究与其他工业领域相比,存在的差距主要表现在下述几个方面:

(1) 研究工作起步晚,重视不够

早在 30 年代,电化学研究取得突破性进展,腐蚀科学的研究获得大的发展,各个工业领域的腐蚀与防护研究,到 60 年代已取得决定性成果,而煤炭系统在该方面的研究从 60 年代后期刚刚开始,而且存在着用廉价钢材取代防护处理的思想。在国内外大型腐蚀与防护的国际会议及著名学术刊物上,罕见煤炭系统的研究者。

(2) 研究工作不够系统化,尚未形成自身的特色

煤炭工业腐蚀与防护的研究主要着眼于防护,没有从根本上形成从原理到防护技术研究的系统的路线,在采取的防护技术方面,针对性不强,防护工作带有一定的盲目性。而其他领域,如海水^[48,49]、各种气候^[50,51]和自然环境^[52]工业模拟的研究^[53]进行得非常充分,针对性和普遍意义都很强。虽说各个领域可以相互借鉴,但煤炭系统应该有自己的特色,尤其在各种研究中忽视了一个重要因素:煤的作用。

(3) 研究力量不足,研究手段落后

这一问题在国内煤炭系统比较突出。至今尚没有专门的大型腐蚀与防护研究机构,人员多分散在研究所、高校的有关专业,即使已开展的一些腐蚀研究,采用先进的技术手段和理论分析也不多见。而电子计算机曲线拟合及交流阻抗技术早已应用于土壤中的金属腐蚀的研究^[54],对各种耐候钢、碳钢的大气腐蚀对比研究等,也已采用计算机统计分析处理^[55,56,57]。

1.3.2 煤炭工业金属腐蚀研究的意义

我国经济建设的发展在较长一段时间内离不开煤炭^[58]。世界

上公认煤是通向未来可以再生能源为基础的持久能源体系的桥梁,以其产量丰富和价格低廉将在今后的能源市场上起主要作用。按现在的开采速度,预计世界硬煤储量可够开采 170 a,褐煤可够开采 390 a。1973~1993 年,世界能源产出量增长 38%,其中天然气增长 60%,石油增长 12%,煤炭增长 28%。我国是用煤大国,煤在能源消费结构中占到 70% 以上。21 世纪初能源需求增长部分的 75% 左右仍需用煤来满足,即在今后相当长时间内我国以煤炭为主的一次能源结构不会有大的变化。

煤矿井下生产环境复杂,矿井水中含有复杂的影响金属腐蚀的多种元素和离子;由于通风的要求,井下一般处于富氧状态,空气中含有 SO_2 、 CH_4 、 CO 、 CO_2 、 O_2 等气体;同时在不同的深度、不同的部位存在较大的温差、湿度差;设备存在碰撞、摩擦等因素作用,等等,这些因素都促进了井下金属的腐蚀,也给井下金属的腐蚀和防护研究带来复杂性。根据德国的资料,煤中组分达 475 种,煤在燃烧过程中放出大量的 SO_2 、 CO_2 、 CO 、 NO_x 以及烃类化合物等有机化合物^[59],造成燃煤环境中的金属严重腐蚀。

按照煤矿的生产规模,一般规定一个矿井的服务年限为^[60]: 年产 300 万 t 及以上矿井不小于 50 a,年产 120~240 万 t 矿井不小于 40 a,年产 45~90 万 t 矿井不小于 30 a。而一个矿井从建井到开采,需要大量的金属支护装备,要保证这些井下金属在规定的服务年限内安全工作,必须研究其腐蚀规律和采取适当的防护措施。有一年产 100 万 t 的矿井由于井筒支护金属腐蚀造成井筒变形,直接经济损失达到 1 千万元。

1.4 煤炭工业金属腐蚀的形式

1.4.1 金属腐蚀的分类

由于腐蚀的复杂性和研究者的角度不同,有多种金属腐蚀的

分类方法^[1~11]。

根据腐蚀进行的历程,可以把腐蚀分成两类:化学腐蚀和电化学腐蚀。前者服从多相反应的化学动力学基本规律,后者遵循电化学动力学的基本规律。

根据腐蚀过程进行的条件,可分为高温气体腐蚀(干腐蚀)和水介质中腐蚀(湿腐蚀)。

根据腐蚀产生的环境状态,可以将腐蚀分为:

① 自然环境中的腐蚀,包括大气腐蚀、土壤腐蚀、海水腐蚀、微生物腐蚀等;

② 工业环境介质中的腐蚀,包括酸性溶液腐蚀、碱性溶液腐蚀、盐类溶液腐蚀、工业水腐蚀、燃气腐蚀等。

根据腐蚀形态可将腐蚀分为:

① 全面性腐蚀,腐蚀分布在金属表面上,可以是均匀的,也可以是不均匀的;

② 局部性腐蚀,腐蚀主要集中在金属表面一定的区域,其他部分几乎未腐蚀。局部腐蚀包括以下几种类型:电偶腐蚀(接触腐蚀),点腐蚀(孔蚀),缝隙腐蚀,晶间腐蚀,选择性腐蚀,焊缝腐蚀,丝状腐蚀;

③ 在力学和环境因素共同作用下的腐蚀,包括:氢损伤,氢脆,氢鼓泡,氢腐蚀,应力腐蚀和应力腐蚀断裂,腐蚀疲劳,磨损腐蚀,空化腐蚀,冲蚀、微振腐蚀。

在一般情况下,局部腐蚀可导致危险性事故。如氢脆和应力腐蚀可导致金属构件的突发性脆断,因而引起了更广泛的重视。

1.4.2 煤炭领域金属腐蚀的形态

按煤炭生产和转化的过程,金属腐蚀可分为:

① 煤矿井下设备的金属腐蚀,腐蚀形态主要有大气腐蚀、矿井水腐蚀、土壤腐蚀、接触腐蚀、应力腐蚀、磨损腐蚀、微生物腐蚀、杂散电流腐蚀;