

耐蚀低合金结构钢

Corrosion Resistant Low Alloy Structural Steels

李晓刚 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

耐蚀低合金结构钢

李晓刚 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2018

内 容 提 要

本书对低合金结构钢的腐蚀环境和腐蚀类型进行了深入的分析,建立了系列化低合金结构钢腐蚀试验与评价技术,对低合金结构钢在微纳米尺度上的腐蚀组织结构的起源基本问题进行了探讨,提出了在不影响低合金结构钢强韧性、焊接性和其他性能前提下,提高其耐蚀性能的微合金化、组织调控和表面调控的基本原则。

本书可供金属材料领域的科研人员、设计人员、生产人员和使用单位学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

耐蚀低合金结构钢 / 李晓刚著. —北京:冶金工业出版社, 2018.9

ISBN 978-7-5024-7880-3

I. ①耐… II. ①李… III. ①耐蚀钢—低合金钢—结构钢 IV. ①TG142.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 217339 号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 刘小峰 曾 媛 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7880-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2018年9月第1版,2018年9月第1次印刷

169mm×239mm; 12.5印张; 4彩页; 251千字; 184页

99.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

低合金结构钢是在碳素结构钢的基础上，通过加入少量合金元素（通常 $\leq 5\%$ ），并经过热轧、控轧控冷或热处理工艺，使其具有高强度、高韧性、较好的焊接性、成型性和耐腐蚀性等性能的一大类钢种。这类钢材主要用于制造桥梁、船舶、车辆、石油平台、锅炉、高压容器、化工容器、管道、重型机械、大型钢结构和基础设施等。低合金结构钢的生产工艺以及水平，是一个国家钢铁材料水平的重要标志，在一定程度上显示了国家综合竞争实力的高低。

低合金结构钢性能特点：（1）高强度：一般屈服强度在300MPa以上。（2）高塑性和韧性：要求延伸率为15%~20%，室温冲击韧性大于600~800kJ/m²。对于大型焊接构件，还要求有较高的断裂韧性。（3）良好的焊接性能和冷成型性能。（4）低的冷脆转变温度。（5）良好的耐蚀性。

1867~1874年，美国开始发展含铬结构钢，这是低合金结构钢概念和品种开始萌芽的阶段；1902~1906年，借助于发展含铬结构钢的经验，美国开始发展含镍结构钢，并逐渐发展成为新品种和新体系；1915年，美国开始发展以含锰、低碳（ $\leq 0.1\%$ ）和低硫（ $\leq 0.015\%$ ）为主要特征的低合金钢，以进一步提高低合金钢的性能。近几十年来，通过进一步降低碳含量、微合金化和控制轧制，发展了一系列新型低合金高强度结构钢，主要有以下四种：微合金化低碳高强度钢、低碳贝氏体型钢、低碳索氏体型钢、针状铁素体贝氏体型钢。在美国，这类钢被称为高强度低合金钢（HSLA）；俄罗斯及东欧各国称其为低合金建筑钢；日本命名为高张力钢。国内最初是把它划入普通结构钢范围，概念上的模糊导致了产品质量差异。在名称上几经变化，如低合

金建筑钢、普通低合金钢、低合金结构钢，至 1994 年叫做低合金高强度结构钢 (GB/T 1591—94)。到目前为止，低合金结构钢的名称仍然未完全标准化。国家标准 GB/T 1591—2001 中规定，我国的低合金结构钢分为 8 个强度等级：Q355、Q390、Q420、Q460、Q500、Q550、Q620、Q690，质量上分为 B、C、D、E、F 等级。

我国于 1957 年在鞍钢试制成功第一炉低合金钢 16Mn，随后研制出 16Mn 系列的桥梁、船舶、锅炉、压力容器、汽车用低合金结构钢。1966 年，低合金钢产量为 141 万吨，占钢产量的 8%；1979 年，低合金钢产量为 254 万吨，仍占钢产量的 8%。目前我国钢材年产量已达 8 亿吨以上，钢材数量不再是需求的主要矛盾，钢材品种结构不合理成为矛盾的焦点。行业的主要任务是提高产品市场竞争力，拓展低合金钢品种。我国低合金结构钢强度级别低、成分波动大、杂质多、性能不稳定，在国际竞争中处于劣势，导致我国每年大量进口高品质低合金高强度钢。近年来，不少普碳钢企业意识到高品质低合金结构钢生产是提高产品技术含量和附加值的关键，特别是有关高纯净、细晶化“超级钢”概念的提出与基础研究的推动，使企业的设备、工艺和产品有了长足的发展，低合金结构钢在技术、数量、质量上有了很大提高，竞争力显著增强。

大型海洋石油平台、跨海大桥、南海岛礁建设、奥运场馆、中央电视台新址结构、上海世博会展馆、水坝电站、超高层建筑等国家重大工程，对低合金结构钢提出了新的需求和要求。大型高层钢结构建筑受力复杂，其服役环境越来越严酷，例如高温、高湿、高盐雾、高辐照的海洋环境，要求结构安全可靠，能够抵抗突发灾害（如水、火、地震、风暴等），尤其是深海探测、极地建筑、大型 LNG 船等要求更高。因此，其用材除了有足够的屈服强度和抗拉强度外，首当其冲是要求其具有高耐蚀性，还要求具有低的屈强比、较强抗低温能力、良好的冷变形能力和高的塑性变形功，以防止局部超载失稳的情况下发

生瞬间断裂。因此,发展低成本、轻量化、高性能的低合金高强度结构钢,是提高产品竞争力的必由之路,也是我国由钢铁大国向钢铁强国转变的重要步骤。

低合金高强度钢的合金化原理主要是利用合金元素产生的固溶强化、细晶强化、相变强化以及沉淀强化来提高钢的强度,同时利用细晶化使钢的韧脆转化温度降低效应,来抵消钢中碳氮化物析出强化使钢韧脆转变温度升高的不利影响,使钢在获得高强度的同时又能保持较好的综合性能。近年以控制轧制技术和微合金化冶金学为基础,开发了许多低合金高强度钢新品种,主要发展方向有以下几个方面:

(1) 低碳、超低碳和高纯净化。现代的工艺技术已非常先进,采用顶底复吹转炉冶炼,钢的碳含量可控制在 $0.02\% \sim 0.03\%$, 精炼技术的应用可生产出 $C 0.002\% \sim 0.003\%$ 、 $S + P < 0.001\%$ 、 $H < 2\text{ppm}$ 和 $O < 10\text{ppm}$ 的洁净钢。

(2) 复合微合金化钢。Nb 微合金化钢、Nb - V 和 Nb - Ti 复合微合金钢几乎占有近 20 年来新开发微合金化钢全部牌号的 75% 和微合金化钢总产量的 60%。微量 Ti ($\leq 0.015\%$) 的作用十分有益, Ti 的微处理不仅可改变钢中硫化物的形态,而且 TiO_2 或 Ti_2O_3 颗粒还成为奥氏体晶内铁素体晶粒生核的质点。近 10 年来开发了高温塑性连铸钢、大线能量焊接无裂纹钢、深冲冷成型钢、烘烤硬化钢、抗硫化氢应力腐蚀钢、无时效倾向桥梁钢、低屈强比抗震钢等一系列钢材新品种,在低合金结构钢的性能提升方面获得了极大的进步。

(3) 控制轧制和控制冷却。在再结晶控轧的基础上,应变诱导相变和析出的非再结晶控轧以及两相区形变,已成为控轧厚钢板生产主要方向。薄板坯连铸连轧流程和薄带连铸工艺的实用化,使低合金钢生产进入了又一个新境界。热机械处理 (TMCP),即通过轧制冷却过程中对合金化合物的溶解与析出,奥氏体的形变、再结晶及其亚结构形成,奥氏体的分解及 α 相形核长大过程等的控制,实现对组织的优

化与性能的提升。由此把控制轧制归纳为高温再结晶控轧和正常化控轧两类，基于对再结晶的延缓力和再结晶驱动力的微合金化设计和由形变诱导机制进行的合金化设计，构成了 TMCP 工艺物理冶金的核心技术。

(4) 超细晶粒化和计算机控制以及性能预报。通过加大轧制变形、铁素体的应变诱导析出、低温轧制和选择合适的冷却速度，可得到细化的铁素体晶粒，从而大大提高钢的强度。晶粒细化和碳氮化物析出是微合金化钢强韧化的基础。

近 20 年来，我国低合金结构钢的高纯净细晶化理论研究取得了长足的进步，由此带动了低合金结构钢生产设备、工艺和品种的快速发展，强韧性得到明显提升。然而，由于缺乏对其耐蚀性能及调控理论的研究，较差的耐蚀性导致其综合性能与世界一流水平尚有一定差距。如近年来美国的主流海工钢中厚板通过合金化和微观组织调整，生产的高性能钢（high performance steel, HPS）强度已超过 700MPa，强韧性、焊接性与耐蚀性兼具，已大量投入到海洋建设中，其屈服强度也正向 1000MPa 发展。我国海洋工程低合金结构钢发展较慢，主流中厚板钢种强度刚刚达到 690MPa，并向 780MPa 发展，但其焊接性与耐蚀性都较差，与国外海洋耐蚀钢相比仍存在巨大差距。翁宇庆院士 2013 年曾指出，目前面对海洋服役环境下钢材对耐蚀性的要求，我国还没有能全面达标的品种。虽然新型高性能结构钢的开发通过低碳含量（ $\leq 0.08\%$ ），采用 TMCP、调质、析出强化或采用加速冷却或直接淬火工艺等先进冶金生产工艺后，钢材的强度、焊接性能、低温韧性、抗脆断性能、高温蠕变性能、疲劳性能以及持久强度等方面都较普通钢材得到较大改善，但其耐蚀性仍然是制约耐蚀结构钢品质提升的瓶颈。

低合金结构钢构件主要在大气、海水、土壤、微生物等自然环境中服役，也可能在盐、碱、 H_2S 和其他工业环境中工作。低合金结构钢在以上实际环境中会发生化学、电化学、物理并兼有应力的作用而导

致腐蚀破坏，常表现为均匀腐蚀、电偶腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀或腐蚀疲劳、微生物腐蚀等腐蚀类型。对腐蚀环境和腐蚀类型与微纳米结构之间关系研究的缺乏，是发展高品质耐蚀结构钢的另一个障碍。

本书在大量最新腐蚀机理与规律试验研究成果的基础上，对低合金结构钢的腐蚀环境和腐蚀类型进行了深入的分析，建立了系列化低合金结构钢腐蚀试验与评价技术，对低合金结构钢在微纳米尺度上的腐蚀组织结构起源机理进行了探讨，提出了在不影响低合金结构钢强韧性、焊接性和其他性能前提下，提高其耐蚀性能的微合金化、组织调控和表面调控的基本原则，目的是为发展我国高品质耐蚀低合金钢新品种提供更加坚实的试验与评价技术和理论研究基础，催生具有我国特色的高品质耐蚀低合金钢的牌号标准，推动高品质耐蚀低合金钢的产业化进程。

本书是著者领导的“材料腐蚀与防护”研究团队在“耐蚀低合金结构钢基础研究与品种开发”研究方向上阶段性成果的总结，是一百余位科技工作者集体智慧的结晶。我们愿将系统的研究成果回馈社会，尤其是为“耐蚀低合金结构钢”研究、设计、生产和使用单位或个人提供参考，以推进我国耐蚀低合金结构钢的升级换代，提升我国用材水平。

本书可能存在各种错误和缺陷，若读者发现，请及时赐教与指正。

本书涉及的系列科研工作是在国家科技部、国家自然科学基金委员会、南京钢铁股份有限公司、鞍山钢铁集团有限公司、首钢集团有限公司等单位的资助下完成的，在此一并致谢！特别感谢国家科技部“973”项目“海洋工程装备材料腐蚀与防护关键技术基础研究”的支持，著者作为该项目的首席科学家，直接领导和参加了“耐蚀低合金结构钢基础研究与品种开发”具体研究工作，产生了本书的成果。

国家材料环境腐蚀平台的同事们对该项研究给予了大力支持；北

京科技大学新材料技术研究院的程学群教授、刘智勇副教授、黄运华教授是本研究方向的主要负责人；杜翠薇教授、董超芳教授、肖葵研究员、张达威教授、吴俊升教授、高瑾研究员、卢琳副教授、马宏驰讲师、刘超博士、王力伟博士、赵天亮博士、郝文魁博士、宋义全博士、梁平博士等提供了大量的试验结果；裴梓博博士、孙美慧博士、贾静焕博士、杨颖博士、吴伟博士、杨小佳博士等参加了部分工作；南钢研究院的吴年春高工、尹雨群教授级高工；鞍钢研究院的任子平教授级高工、王长顺高工、武裕民工程师、陈义庆教授级高工；首钢集团有限公司的杨建炜高工等一线科技人员对本工作给予了直接支持，在此一并致谢！

师昌绪院士、肖纪美院士、柯伟院士、侯保荣院士、薛群基院士、王海舟院士、翁宇庆院士、谢建新院士和毛新平院士等长期给予了大力支持与帮助，在此深表感谢！

李 晓 刚

2018年9月

目 录

1 低合金结构钢的腐蚀环境与腐蚀类型	1
1.1 自然腐蚀环境	1
1.1.1 大气腐蚀环境	1
1.1.2 土壤腐蚀环境	2
1.1.3 自然水腐蚀环境	4
1.2 工业腐蚀环境	6
1.2.1 石油工业腐蚀环境	6
1.2.2 化学工业腐蚀环境	7
1.2.3 核电工业腐蚀环境	7
1.3 实验室模拟与加速腐蚀试验环境	8
1.3.1 模拟气氛腐蚀试验	8
1.3.2 模拟干湿交替腐蚀试验	8
1.3.3 盐雾腐蚀试验	9
1.3.4 模拟海水腐蚀试验	10
1.3.5 模拟土壤腐蚀试验	10
1.4 低合金结构钢的腐蚀类型	12
1.4.1 全面腐蚀	12
1.4.2 电偶腐蚀	12
1.4.3 点蚀	13
1.4.4 缝隙腐蚀	14
1.4.5 应力腐蚀开裂和腐蚀疲劳	15
1.5 小结	18
2 低合金结构钢的腐蚀试验与评价	19
2.1 低合金结构钢均匀腐蚀试验与评价	19
2.1.1 试样与试验溶液	19
2.1.2 试验过程基本要求	20
2.1.3 试验评价	20
2.2 低合金结构钢宏观电化学腐蚀试验与评价	21

2.2.1	试验原理	21
2.2.2	试验过程基本要求	24
2.2.3	试验评价	24
2.3	局部腐蚀试验与评价	24
2.3.1	点蚀试验与评价	24
2.3.2	缝隙腐蚀试验与评价	25
2.3.3	电偶腐蚀试验与评价	28
2.3.4	晶间腐蚀试验与评价	30
2.4	应力—化学腐蚀试验与评价	31
2.4.1	应力腐蚀试验与评价	31
2.4.2	腐蚀疲劳试验与评价	34
2.5	小结	36
3	低合金结构钢腐蚀试验与评价新技术	37
3.1	腐蚀微区形貌观察技术	37
3.1.1	数码相机	37
3.1.2	显微镜	37
3.1.3	电子显微镜	39
3.2	腐蚀微区物相分析技术	42
3.2.1	腐蚀产物宏观观察	43
3.2.2	腐蚀产物微观观察	44
3.2.3	腐蚀产物微观定量分析	44
3.3	腐蚀微区电化学测量技术	45
3.3.1	电流敏感度原子力显微镜技术	45
3.3.2	扫描开尔文探针测量技术	46
3.3.3	扫描振动电极技术	46
3.3.4	扫描电化学显微镜技术	48
3.3.5	局部交流阻抗测量	49
3.4	腐蚀大数据及其评价技术	53
3.4.1	“腐蚀大数据”理论与技术	53
3.4.2	“腐蚀大数据”评价案例	55
3.5	小结	57
	参考文献	57

4 低合金结构钢腐蚀的夹杂物起源	59
4.1 低合金结构钢表面腐蚀电池	59
4.1.1 低合金结构钢腐蚀的宏观原电池	59
4.1.2 低合金钢腐蚀的表面微电池	60
4.2 常见夹杂物诱发腐蚀的机理	61
4.2.1 MnS 夹杂物诱发腐蚀的机理	62
4.2.2 Al ₂ O ₃ 夹杂物诱发腐蚀的机理	63
4.2.3 稀土改性夹杂物诱发腐蚀的机理	68
4.2.4 其他非金属夹杂物对低合金钢耐蚀性的影响	75
4.3 小结	79
参考文献	79
5 低合金结构钢腐蚀的相电化学起源	81
5.1 低合金钢腐蚀相电化学起源的实验观察	82
5.1.1 珠光体与夹杂物协同腐蚀起源实验观察	82
5.1.2 不同珠光体含量对腐蚀起源影响的实验观察	84
5.1.3 珠光体与其他组织协同腐蚀起源的实验观察	88
5.2 低合金钢腐蚀起源的微区电化学特性	92
5.3 晶粒大小、取向和畸变与腐蚀起源	94
5.3.1 晶粒大小与腐蚀起源	94
5.3.2 晶粒取向与腐蚀起源	95
5.4 析出相大小与腐蚀起源	102
5.5 小结	105
参考文献	105
6 低合金结构钢耐蚀性能的成分调控	107
6.1 基于物理冶金理论的耐蚀性能成分调控	107
6.1.1 合金元素对低合金结构钢耐蚀性能的作用	108
6.1.2 典型的低合金耐蚀钢	108
6.2 基于现场腐蚀暴晒试验的耐蚀性能成分调控	110
6.2.1 合金元素对海洋用钢全浸区腐蚀的影响规律	110
6.2.2 合金元素对海洋用钢潮差区腐蚀的影响规律	110
6.2.3 合金元素对海洋用钢飞溅区腐蚀的影响规律	111
6.3 基于室内腐蚀试验的耐蚀性能成分调控	113
6.3.1 耐候钢合金成分设计	113

6.3.2	耐候钢室内腐蚀试验	114
6.3.3	耐候钢室内腐蚀评价	117
6.4	基于腐蚀电化学的耐蚀性能成分调控	117
6.4.1	纯金属的热力学稳定性	117
6.4.2	影响纯金属耐蚀性的动力学因素	120
6.4.3	提高金属材料耐蚀性的成分调控原理和途径	120
6.5	小结	122
7	低合金结构钢耐蚀性能的组织调控	124
7.1	低合金结构钢不同组织类型的腐蚀特性	124
7.1.1	低合金结构钢组织类型调控	124
7.1.2	低合金结构钢不同组织类型的腐蚀特性	129
7.2	低合金结构钢不同组织类型的电偶腐蚀试验	132
7.3	低合金结构钢组织腐蚀的微电池分析	135
7.4	低合金结构钢耐蚀性能组织调控原则	137
7.4.1	提高整体腐蚀电位,单一组织或减小微观组织间电位差	137
7.4.2	避免“大阴极小阳极”的微观组织	138
7.4.3	细化晶粒、小角度晶界设计,消除晶粒畸变和织构	138
7.5	小结	139
	参考文献	139
8	低合金结构钢耐蚀性能的表面调控	140
8.1	低合金结构钢表面氧化物和氧化膜	140
8.1.1	金属氧化物的晶体结构	140
8.1.2	低合金结构钢表面薄氧化膜的生长	142
8.2	耐候钢的锈层结构及保护性	144
8.3	低合金结构钢表面结构调控	146
8.4	低合金结构钢锈层的稳定化处理	148
8.4.1	低合金结构钢锈层的稳定化处理技术	149
8.4.2	低合金结构钢锈层的稳定化处理技术案例	149
8.5	小结	151
	参考文献	152
9	低合金结构钢焊缝的耐蚀性能调控	153
9.1	低合金结构钢焊缝组织与腐蚀相电化学起源	153

9.2	低合金结构钢焊缝应力腐蚀敏感性	155
9.3	低合金结构钢焊缝耐蚀性的成分调控	156
9.4	低合金结构钢焊缝耐蚀性的组织调控	157
9.4.1	试样准备与试验	157
9.4.2	试验结果与分析	158
9.5	小结	167
	参考文献	167
10	腐蚀环境与耐蚀低合金钢新品种	169
10.1	低合金结构钢构件的腐蚀环境分析	170
10.1.1	低合金结构钢构件的大气、土壤和水腐蚀环境分析	170
10.1.2	低合金结构钢构件的特殊腐蚀环境分析	171
10.2	低合金结构钢构件腐蚀局部环境和微型环境	172
10.3	低合金结构钢腐蚀进程中的腐蚀微环境变化	173
10.3.1	涂镀层下的腐蚀微环境变化	173
10.3.2	均匀腐蚀产物层下的腐蚀微环境变化	179
10.3.3	局部腐蚀类型的腐蚀微环境变化	181
10.4	耐蚀低合金钢新品种展望	183
10.5	小结	184

1 低合金结构钢的腐蚀环境与腐蚀类型

腐蚀的定义是指材料在特定环境中，与环境交互作用，发生了化学或电化学反应使其性能下降的过程。任何材料，特别是金属材料或钢铁材料，都是在特定的环境下使用。材料若在非设计允许的环境条件下使用，必将发生过快过早的腐蚀破坏，轻则造成经济损失，重则导致重大环境污染和人员伤亡事故。

据统计，低合金结构钢一半以上都是在自然环境（大气、土壤和水环境）中服役的，另外一部分是在工业酸、碱、盐环境或高温高压环境下使用，还有极少部分是在极端严酷环境下使用，如南海高温高湿高盐雾高辐射海洋大气环境、超过 300m 以下的深海环境、太空辐射环境、南北极的极地环境，以及干热沙漠环境等，低合金结构钢的服役环境极其复杂。研究表明，低合金结构钢在具体环境下的腐蚀类型也是多样化的，这就导致了低合金结构钢品种必须复杂化。对低合金结构钢的腐蚀环境和腐蚀类型正确而全面的认识，是发展高品质低合金结构钢的首要关键问题。本章在大量试验研究积累的基础上，对低合金结构钢的腐蚀环境和腐蚀类型进行了讨论，力图为发展高品质低合金结构钢新品种奠定环境研究基础。

1.1 自然腐蚀环境

1.1.1 大气腐蚀环境

大气腐蚀环境占总腐蚀环境的一半以上。按表面的潮湿度，大气腐蚀可以分成三类：

(1) 干大气腐蚀。表面存在不连续液膜层时，在生成氧化物反应自由能为负的金属表面形成极薄的不可见氧化膜，如铁的氧化膜厚度约为 30nm。

(2) 潮大气腐蚀。当金属表面存在肉眼看不见的薄液膜层时发生的腐蚀，如铁在没有被雨雪淋到时的生锈。

(3) 湿大气腐蚀。当空气湿度接近 100%，或当水分以雨、雪、泡沫等形式落在金属表面上时，金属表面存在着用肉眼可见的凝结水膜层时所发生的腐蚀。

按地区条件和大气特征，可分为农村大气、海洋大气、城郊大气、工业大气等。

大气腐蚀的主要环境影响因素包括：

(1) 湿度。湿度越大，金属表面结露越容易，电解液膜存在的时间也越长，

腐蚀速度增加。各种金属都有一个腐蚀速度开始急剧增加的湿度范围，腐蚀速度开始急剧增加的大气相对湿度称为临界湿度，钢铁、铜、镍、锌等金属的临界湿度在 50% ~ 70% 之间。

(2) 温度。在其他条件相同时，平均气温高的地区，大气腐蚀速度较大。

(3) 降雨量。雨水沾湿金属表面，冲刷破坏腐蚀产物保护层，加速腐蚀。据调查，钢的大气腐蚀量有一半是雨雪直接腐蚀造成的。但雨水能把原来附着在金属表面上的灰尘、盐粒或锈层中易溶于水的腐蚀性物质冲洗掉，这样在某种程度上减缓了腐蚀。

(4) 大气成分。在大气的基本组成外，大气污染物质，如硫化物、氮化物、CO、CO₂ 等，来自自然界如海水的氯化钠以及其他固体颗粒尘埃，对金属大气腐蚀影响较大。

(5) 异常气候条件的影响。如酸雨条件下，Fe、Zn、Cu、Pb 等金属的耐蚀性大幅降低。

总之，各种大气环境因素的作用是错综复杂的，金属材料在具体大气环境条件下的腐蚀行为需要通过长期的现场试验来确定。通常的大气环境的腐蚀性分级见表 1-1。

表 1-1 以不同金属暴露第一年的腐蚀速率进行环境腐蚀性分级

腐蚀类型	金属的腐蚀速率				
	单位	碳钢	锌	铜	铝
C1 (很低)	$g/(m^2 \cdot a)$	<10	<0.7	<0.9	<0.2
	$\mu m/a$	<1.3	<0.1	<0.2	
C2 (低)	$g/(m^2 \cdot a)$	10 ~ 200	0.7 ~ 5	0.9 ~ 5	
	$\mu m/a$	1.3 ~ 25	0.1 ~ 0.7	0.1 ~ 0.6	
C3 (中)	$g/(m^2 \cdot a)$	200 ~ 400	5 ~ 15	5 ~ 12	0.6 ~ 1.3
	$\mu m/a$	25 ~ 50	0.7 ~ 2.1	0.6 ~ 1.3	
C4 (高)	$g/(m^2 \cdot a)$	400 ~ 650	15 ~ 30	12 ~ 25	
	$\mu m/a$	50 ~ 80	2.1 ~ 4.2	1.3 ~ 2.8	
C5 (很高)	$g/(m^2 \cdot a)$	650 ~ 1500	30 ~ 60	25 ~ 50	
	$\mu m/a$	80 ~ 200	4.2 ~ 8.4	2.8 ~ 5.6	

1.1.2 土壤腐蚀环境

土壤由各种颗粒状的矿物质、水分、气体及微生物等多相组成，具有生物活性、离子导电性和毛细管胶体特性，是一种特殊的电解质，可能诱发金属不均匀的全面腐蚀和严重的局部腐蚀。杂散电流和微生物也会影响土壤腐蚀。

土壤腐蚀和其他介质的电化学腐蚀过程一样，都是因金属和介质的电化学不均一性形成的腐蚀原电池作用所致。同时，由于土壤介质具有多相性、不均匀性和相对稳定性等特点，土壤环境造成的金属腐蚀具有自身独特的腐蚀机理与动力学发展过程，如土壤的宏观不均一性所引起的腐蚀宏电池，往往在土壤腐蚀中起着更大的作用。

土壤介质的不均一性主要是由于土壤透气性不同引起的。在不同透气条件下，氧的渗透速度变化幅度很大，强烈影响和不同区域土壤相接触的金属各部分的电位，这是促使建立氧浓差腐蚀电池的基本因素。土壤的 pH 值、盐含量等性质的变化也会造成腐蚀宏电池。长距离管道难免要穿越各种不同条件的土壤，形成有别于其他介质情况的长距离腐蚀宏电池。在土壤中起作用的腐蚀宏电池有下列类型：（1）长距离腐蚀宏电池。埋设于地下的长距离金属构件通过组成、结构不同的土壤时形成长距离宏电池。（2）土壤的局部不均一性所引起的腐蚀宏电池。土壤中石块的透气性比土壤本体差，使得该区域金属成为腐蚀宏电池的阳极，和土壤本体区域接触的的金属就成为阴极。（3）埋设深度不同及边缘效应所引起的腐蚀宏电池。埋设深度的不同，造成氧浓差腐蚀电池。由于氧更容易到达电极的边缘，在同一水平面上金属构件的边缘就成为阴极，比成为阳极的构件中央部分腐蚀要轻微得多，地下大型储罐常会出现这类腐蚀情况。（4）金属所处状态的差异引起的腐蚀宏电池。土壤中异种金属的接触、温差、应力及金属表面状态的不同，也能形成腐蚀宏电池，造成局部腐蚀，如新旧管道连接埋于土壤中形成的腐蚀电池。

影响土壤腐蚀的环境因素主要包括：

（1）孔隙度（透气性）。较大的孔隙度有利于氧渗透和水分传输，而这都是腐蚀初始发生的促进因素。透气性有两方面的作用：透气性良好一般会加速微电池作用的腐蚀过程，但是透气性太大，易在金属表面生成具有保护能力的腐蚀产物层，阻碍金属的阳极溶解，使腐蚀速度减慢下来。当形成腐蚀宏电池时，由于氧浓差电池的作用，透气性差的区域将成为阳极而发生严重腐蚀。当透气性不良的土壤中存在微生物活动时，由于厌氧微生物的作用而产生严重的微生物腐蚀。

（2）土壤温度。温度越高，腐蚀速度越大。

（3）土壤含水量。当土壤水含量很高时（水饱和度大于 80%），氧的扩散渗透受到阻碍，腐蚀减小；随着水含量的减少，氧的去极化变易，腐蚀速度增加；当水含量下降到约 10% 以下，阳极极化和土壤电阻率加大，腐蚀速度又急速降低。

（4）pH 值。随着土壤酸度增高，土壤腐蚀性增加。当在土壤中含有大量有机酸时，其 pH 值虽然接近于中性，但其腐蚀性仍然很强。

（5）电阻率。一般来说，土壤电阻率越小，土壤腐蚀越严重，可以把土壤