

# 腐蚀成本及控制策略研究

马秀敏<sup>1,2</sup>, 郑 萌<sup>1,2</sup>, 徐玮辰<sup>1,2</sup>, 路东柱<sup>1,2</sup>, 麻福斌<sup>1,2</sup>, 侯保荣<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 海洋研究所 海洋腐蚀与生物污损重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋腐蚀与防护开放工作室, 山东 青岛 266237)

**摘要:** 材料腐蚀对国民经济的发展造成严重的影响, 因此腐蚀问题引起广泛关注。本文回顾了国内外在历史上几次主要的腐蚀调查工作, 对国际通用的典型腐蚀成本调查统计方法进行了详细解读, 并对重大咨询项目“我国腐蚀状况及控制战略研究”的主要工作做了重点陈述。腐蚀与防护是安全问题, 是经济问题, 是国计民生问题, 是生态文明问题, 更是国家文明发展程度的反映, 而全国范围内的腐蚀调查工作的重要意义即在于摸清我国腐蚀状况的总体情况, 为腐蚀防护提供针对性的对策建议, 并为国家相关政策的制定提供重要的参考依据和数据支撑。

**关键词:** 腐蚀成本; 统计方法; 腐蚀防护; 经济

**中图分类号:** TG174

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3096(2021)02-0161-08

**DOI:** 10.11759/hyxx20200428001

腐蚀是一种悄悄进行的破坏, 据统计估算, 全世界每 90 秒就有一吨钢铁变成铁锈, 而每年因腐蚀带来的直接与间接损失已远远大于飓风、地震等自然灾害和其他各类事故损失的总和<sup>[1-2]</sup>。

众所周知, 腐蚀问题是世界各国共同面临的难题, 凡是使用材料的地方, 都不可避免的存在腐蚀问题。随着“一带一路”的推进, 我国各行各业呈现出蓬勃发展的态势, 其中材料腐蚀是一个不容忽视的问题, 该领域迫切需要腐蚀科学工作者对各种服役材料在不同环境条件下的腐蚀机理和腐蚀控制技术进行更深入的研究。腐蚀调查是世界多国通过一系列调查活动了解各行各业的腐蚀状况, 衡量材料腐蚀引起经济、社会等多方面问题的重要途径<sup>[3]</sup>。通过腐蚀调查工作, 不仅可以取得国家腐蚀成本的重要数据, 同时提高了全民的腐蚀防护意识, 促进了腐蚀防护产业的发展, 对国民经济建设具有十分重要的意义。

本文分析了国内外几次典型的腐蚀调查工作和国际通用的腐蚀调查方法, 并重点陈述了“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目的主要情况, 对该项目的主要成果进行了总结。

## 1 国际上主要腐蚀调查简介

在 1922 年, 英国的冶金学者 Hadfield 最早尝试腐蚀成本估算, 他的方法是仅基于对全世界钢铁年生锈率的估计。而美国的 H. H. Uhlig 是首位将腐蚀成

本进行科学分类和分析的学者, 他在 1949 年发表“The Cost of Corrosion to the United States”, 这是最早估算美国腐蚀损失的研究工作<sup>[4]</sup>。1974 年, Revie 和 Uhlig 对澳大利亚的腐蚀成本进行了详细的估算, 并预计可达到 4.667 亿美元。在这期间, 日本和印度也采用 Uhlig 的方法估算了本国的年度腐蚀成本, 其分别高达 255.093 亿美元和 153.8 亿美元。不过, Uhlig 的方法为保守的估计了腐蚀的直接成本, 计算的成本显然是被低估的<sup>[5]</sup>。

Uhlig 的方法主要是从制造商收集成本数据, 而在 1966 年 3 月, T. P. Hoar 教授主持成立的英国腐蚀防护委员会, 采用了另一种方法, 其主要基于与行业的直接互动, 包括采访腐蚀领域专家、发放问卷调查和开展专题小组会议等, 活动中行业协会和专业团体均参与了收集信息的工作<sup>[5]</sup>。1969 年, 该委员会确定了多个行业的腐蚀损失计算方法, 并针对 200 多个企业进行了腐蚀损失调查。结果表明: 英国年腐蚀损失为 13.65 亿英镑, 占英国 GNP 的 3.5%。Hoar 报告还指出: 通过更好地发挥和利用现有腐蚀防护知识和技术, 大约 20%~25% 的腐蚀损失是可以避免的<sup>[6]</sup>。此外, Hoar 的估算方法还计算出了每个单独的工业部门腐蚀损失

收稿日期: 2020-04-28; 修回日期: 2020-07-20

作者简介: 马秀敏(1978-), 山东德州人, 博士, 副研究员, 主要从事海洋腐蚀与防护研究, 电话: 0532-82898731, E-mail: xma@qdio.ac.cn; 侯保荣, 通信作者, 博士, 研究员, 主要从事海洋腐蚀与防护研究, 电话: 0532-82898731, E-mail: houbr@qdio.ac.cn

占国家腐蚀损失的百分比。不过有人提出,按照 Hoar 方法预测整个国家的腐蚀总成本有很大的不确定性,因为每个行业只有几家公司能够提供腐蚀成本的详细数据,而且这些数字与估计值相差很大<sup>[5]</sup>。

1975 年在美国国会建议下美国国家标准局(National Bureau of Standards, NBS)进行了全国金属材料腐蚀损失的调查研究,并由 Battelle 实验室(Battelle Columbus Division)对腐蚀调研数据进行分析<sup>[7-8]</sup>。本次调研联合了经济专家采取投入/产出(Input/Output, IO)的经济模型估算了腐蚀对美国经济的影响。不过投入/产出的经济模型也存在一些问题,例如具有在量化方面的不确定性和更新数据获取来源比较单一的问题。

另外,美国联合碳化物公司(Union Carbide Corporation)的 Dillon 早在 1966 年提出的一种净现值和等效统一成本的计算方法,也称生命周期成本方法,该方法的数据来源更加全面和系统,后来被 T. P. Hoar 的腐蚀防护委员会所采用并被业界广泛认可<sup>[5]</sup>。

美国是腐蚀损失最严重的国家之一,也是一直以来最重视腐蚀调查活动的国家,表 1 是 1995 年美国公布的 20 世纪 60—80 年代部分国家的腐蚀直接损失调查结果<sup>[1]</sup>。在 1999 年到 2001 年间美国就已经完成了第七次腐蚀调查活动,这次腐蚀调查与以往不同,它联合了多个部门共同参与,由 CC Technologies 公司联合美国腐蚀工程师协会(NACE)、美国交通部和高速公路管理局共同完成<sup>[7]</sup>。目前,其他发达及部分发展中国家,也均进行过不同规模的腐蚀调查,例如在日本正

在进行的第三次腐蚀成本调查活动,该项目由筱原正教授和田边弘往研究员分别担任腐蚀调查委员会主席和腐蚀调查委员会分会主席<sup>[8]</sup>。

最近一次国际性的腐蚀调查活动 IMPACT(the International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies)在 2013 年 10 月份由 NACE 发起,该项目着重研究腐蚀管理对不同行业和政府产生的影响,并尝试寻求更好的腐蚀控制与管理模式。次年, NACE 国际 IMPACT 项目经理一行到我国进行了全面调研,全球腐蚀调查中国区主席由中国科学院海洋研究所侯保荣院士担任<sup>[1]</sup>。

## 2 国内腐蚀调查历史

我国较早的关注到腐蚀的问题,1956 年的科技发展规划就将腐蚀作为一项专题。尽管如此,相较于美、日、英等国家而言,我国近代各个时期对腐蚀的严重性认识依然相对不足,启动腐蚀调查工作较晚<sup>[1]</sup>。近 40 年,我国有几次针对重点行业的腐蚀调查工作。其中,较为有代表性的腐蚀调查工作有四次,即 1980 年,由国家科委腐蚀学科组施行,针对材料腐蚀严重的行业进行了腐蚀损失调查(包括化学、炼油、冶金、化纤等 7 个工业部门),调查研究表明:该年度化学工业、炼油工业、冶金工业和化纤工业中的仅 70 家企业的腐蚀损失就超过了 1.2 亿元,分别占相应行业总产值的 3.97%、0.08%、2.4%和 1.5%<sup>[9]</sup>;1986 年,武汉材料保护研究所开始对机械工业方面的腐蚀损失开展调研工作,本次调查涉及全国 27 个省、市、自治区,课题采取函调、重点现场调查、专家座谈咨询、查阅有关资料文献、走访部分省、市国家统计局等方式对机械工业锈蚀损失进行全面调查,统计了机械工业产品制造所需金属材料的锈蚀损失数据,机械工业产品锈蚀损失数据,各类机械工业产品出口商品锈蚀损失数据,生产用机床设备锈蚀报废损失数据。调查结果指出:本年机械行业的腐蚀损失达 116.245 亿元,占其总产值的 5.64%<sup>[1]</sup>;1999 年,中国工程院院士柯伟研究员和中国科学院院士曹楚南教授等提出申请,建议开展一次涵盖我国重点行业的腐蚀损失调查工作。随后,依托于中国腐蚀与防护学会,由中国科学院金属腐蚀与防护研究所(现中国科学院金属研究所)具体组织实施了中国工程院咨询项目“中国工业与自然环境腐蚀问题调查与对策”,具体涉及自然环境(大气、土壤)、工业环境(石油工业、电力、汽车等)和军事

表 1 部分国家腐蚀损失统计

Tab. 1 Corrosion loss statistics in some countries

| 国家或地区 | 统计时间           | 直接损失/亿美元/年 | 占国民生产总值/% |
|-------|----------------|------------|-----------|
|       | 1949 年         | 55         |           |
| 美国    | 20 世纪 60—70 年代 | 150~200    |           |
|       | 1975 年         | 820        | 4.4       |
| 苏联    | 1969 年         | 67         | 2         |
|       | 1969 年         | 60         | 3         |
| 联邦德国  | 1974 年         | 90         |           |
| 日本    | 1976—1977 年    | 92         | 1.8       |
| 英国    | 1969—1970 年    | 32         | 3.5       |
| 加拿大   | 1965 年         | 10         |           |
| 澳大利亚  | 1973 年         | 4.7~5.5    | 1.5       |
| 瑞典    | 1968 年         | 4          | 1.25      |
| 芬兰    | 1965 年         | 0.47~0.62  |           |
| 印度    | 1960—1961 年    | 3.2        |           |

装备。调查认为: 这些领域的直接腐蚀损失超过 2 000 亿元, 加上间接腐蚀损失总成本约为 5 000 亿元, 是当年国民生产总值的 6%<sup>[1, 9]</sup>; 2014 年初, 为深入了解我国现阶段腐蚀状况, 中国工程院设立了学部级咨询项目“腐蚀成本经济性分析与防腐策略研究预研”, 会议就全国腐蚀调查委员会的人员架构, 腐蚀调查的范围等议题展开了研讨。2014 年年末, “我国腐蚀状况及控制战略研究”正式立项, 相比此前的几次腐蚀状况调查, 此次调查涉及更多领域, 该项目组针对我国 5 大关键领域的 30 多个重点行业腐蚀状况、腐蚀成本及其防控措施进行了为期两年的专题调研。调查指出: 2014 年的我国腐蚀成本约为 21 278.2 亿元, 约占国内生产总值的 3.34%<sup>[1, 10]</sup>。

### 3 主要的腐蚀成本统计方法介绍

国际上通用的腐蚀成本调查和统计方法主要有两种, 即 Uhlig 方法和 Hoar 方法, 另外还有一种经济学矩阵分析法, 即 Battelle-NBS 方法。下文将对这三种方法的具体原理及特点进行介绍。

#### 3.1 Uhlig 方法——直接统计腐蚀防护策略及服务费用

Uhlig 方法于 1949 年由 H. H. Uhlig 教授首创, 用于美国的首次腐蚀调查研究, 主要是将生产、制造方面的防腐蚀措施所需费用进行累加<sup>[5]</sup>。具体来说, 该研究通过统计腐蚀防护方法、产品和相关施工、工程服务的总成本来估算美国的腐蚀成本, 主要包括涂料和涂装费用、缓蚀剂成本及施工费用、耐蚀材料费用、阴极保护材料及施工费用、用于腐蚀防护研究的费用以及腐蚀检测费用等。在该方法的理论中, 这些费用由企业、运营商以及施工方等承担, 被视为由于腐蚀防护或由于发生腐蚀而导致的直接成本, 而腐蚀所造成的除此之外的其他一切经济成本都被视为间接成本, 包括对环境造成破坏导致的费用, 人员伤亡导致的费用以及终端用户所承担的维修更换费用等等, 间接腐蚀成本往往大于直接成本, 根据不同情况可以进行不同程度的估算。通过这些成本叠加, 最终获得了美国当年由腐蚀导致的成本总额。

这种方法的直接经济成本的组成和分类需要考虑尽量周全, 大量数据主要从政府部门、商务局、贸易组织、工业团体和集团公司等渠道获取, 很大程度上依赖于查阅大量统计资料, 并且需要借助于贸易组

织、教育机构的统计数据 and 专家咨询等。

#### 3.2 Hoar 方法——按照行业统计腐蚀防护策略及服务费用

Hoar 方法于 1966 年由 T. P. Hoar 教授首创, 用于英国的腐蚀调查研究。相较于 Uhlig 方法, 该方法从另外一个角度进行统计分析, 即按各行业的腐蚀损失和防蚀费用的总和进行统计推算<sup>[5]</sup>。具体来讲, 该方法的实施需要划分出与腐蚀防护相关的多个行业, 并分别从各个领域入手, 统计各自的腐蚀防护策略及施工、服务等费用。例如, 某行业的某个工厂利用耐蚀材料和涂料涂装作为腐蚀防护措施, 并向相关专业的员工支付酬劳, 如果此外再没有其他与腐蚀防护相关的支出, 那么将这几部分进行叠加, 即为该工厂的腐蚀成本。通过对同一个行业的多个具有代表性的典型企业的腐蚀数据进行收集、推算和分析, 即可得到该行业的腐蚀成本占其总产值的份额。通过此方法, 可以获得与腐蚀防护相关的各个行业的腐蚀成本数据。

Hoar 方法的实施采用函调、问卷调查和实地调研等方法, 以获得可靠的腐蚀数据。Hoar 方法获得不同行业腐蚀数据的难易程度差别较大, 各个行业的腐蚀成本数据的差异也十分显著, 一些公共部门, 例如基础设施和公共事业等, 腐蚀成本的相关信息往往是公开的, 可以从政府报告和其他公开统计的资料中获得重要的数据, 也可以通过咨询特定行业专家, 获取相关数据和建议来丰富腐蚀数据。然而, 有些企业或部门没有现成的腐蚀数据, 或很难统计出与腐蚀相关的成本数据, 甚至在某些特殊因素影响下, 有一些腐蚀数据涉及商业机密, 不方便透露给调查者。在这些情况下, 则需要借助专家咨询、会议讨论等方式, 根据有限的信息获得具有科学意义的腐蚀数据。

与 Uhlig 方法类似的是, Hoar 方法统计的腐蚀成本也可看作直接成本, 而间接成本由于涵盖范围宽泛, 也无法实现精确统计, 只能通过经验和科学推算来获取相关数据。两种方法的差异也十分显著, 首先两者的出发点完全不同, 获得的腐蚀数据也必将具有差异, 最终估算得到的总腐蚀成本也不可能完全一致; 其次, 两种方法获得的腐蚀数据的科学价值和意义也不相同, 通过 Uhlig 方法, 可以横向对比各个腐蚀防护手段及策略的费用情况, 而通过 Hoar 方法则可以对各行业的腐蚀成本情况具有清晰的认

识。两种方法均可为国家针对腐蚀防护的政策导向提供非常重要的数据支撑。

### 3.3 Battelle-NBS 研究方法(投入-产出分析法)

Battelle-NBS 研究方法是美国 1978 年采用的腐蚀成本统计方法,该方法由美国经济学家 Wassily Leontief(1973 诺贝尔经济学奖获得者)所发明(Koch G, 2001)<sup>[5]</sup>。首先需要将经济构成划分为多个行业(1978 年美国的研究将其经济构成划分为 130 个行业),其统计的各行业的总投入不局限于与腐蚀相关的投入,主要包括设备和建筑的更换、产品损失、维修维护、产能过剩、设备过剩、腐蚀控制措施投入(缓蚀剂、除锈剂、有机涂料、金属涂镀层等)、工程技术研发和测试、设计、保险以及库存成本等等。投入-产出模型是一个简化的均衡模型,用于研究经济构成中每个行业把其它行业的投入转化为本行业产出的程度。例如,腐蚀防护需要一定量的油漆,投入-产出模型会显示产出这些油漆所需要的其他各行业的总投入。

划分好行业后,某年度的标准投入-产出矩阵由某行业相对于其他各行业的投入和产出组成矩阵的行和列,可体现各个行业的投入与产出之间的关系,其中就包括了该年度的腐蚀成本。该研究需要准确判断出不同领域中代表腐蚀成本的项目,例如钢管所需要的涂料。涂料行业对钢管行业的影响系数可根据实际需求进行调整。如果认为使用涂料的唯一原因就是防腐,假设一个“没有腐蚀发生的世界”,那么钢管行业在涂料方面的投入就为零,该系数则需要被调整为零。将钢管行业所在的列中与腐蚀相关的投入的系数均进行相应调整,再进行归一化,那么这个新矩阵就对应于一个“没有腐蚀发生的世界”。在各行业的投入相同的条件下,该矩阵中所有行业所创造的生产总值将高于“有腐蚀发生的世界”。Battelle-NBS 方法需要统计由于腐蚀的存在所导致的各种投入的增量,因此其定义了三个“世界”,即世界 I——存在腐蚀的真实世界,世界 II——腐蚀不存在的理想世界和世界 III——腐蚀被有效控制的假想世界。因此,总的腐蚀成本被定义为世界 I 和世界 II 的生产总值的差值,可通过合适的手段避免的腐蚀成本是世界 I 和世界 III 的生产总值的差值,不可避免的腐蚀成本则是世界 II 和世界 III 的生产总值的差值。

有别于上述 Uhlig 方法和 Hoar 方法,该方法实际上是借助于经济学理论的一种分析手段,以经济

体中某行业对其他行业的投入和产出为基础数据,并把与腐蚀防护产品和技术相关的行业(例如涂料行业)与其他使用腐蚀防护产品或技术的行业放在同一个维度(矩阵)中,分析两类行业之间的投入和产出的关系。因此, Battelle-NBS 研究方法不是严格意义上的腐蚀成本调查方法,而是一种对包括腐蚀成本数据在内的经济学数据的分析方法。通过这种分析方法,进行各个“世界”之间的生产总值的差值计算,得到与腐蚀防护相关的总成本。

### 3.4 几种统计方法的对比

在这三种统计方式中, Uhlig 法是从腐蚀防护方法的源头进行统计,因此只要将腐蚀防护方法统计完全,就可以获得腐蚀导致的直接成本,这部分可以通过一些统计部门或行业协会等机构获得,而这些机构一般从属于政府部门或受政府部门监管,自上而下获得数据相对容易,而间接成本则主要是通过推算或经验进行估算而得。

Hoar 方法则是按照行业进行腐蚀成本统计,在理想情况下可以把各个行业中典型企业的直接和间接成本进行统计,然后叠加即为全行业的总腐蚀成本,理论上比 Uhlig 法更为准确。然而,实际调查过程无法满足所谓的理想条件,主要有两个方面的原因,第一是无法对某个企业的各方面成本进行完全统计,特别是间接成本,很难把由于腐蚀导致的成本进行单独核算;第二是很多企业没有意愿为调查者或调查机构提供准确完整的腐蚀数据,或因行业机密问题,或因企业形象问题等,这是在腐蚀调查的实际工作中经常遇到的难题。从获取数据难以程度上来讲, Hoar 法的自下而上获取数据要难于 Uhlig 法的自上而下获取数据。此外, Hoar 法无法把各个行业的所有企业全部进行调查,只能通过某行业中具有代表性的部分企业的数据推算该行业的整体腐蚀成本,因此 Hoar 法和 Uhlig 法均存在估算环节,对估算的准确度和经验具有一定的要求。

因此, Uhlig 法和 Hoar 法均有各自的优缺点,这两种方法的数据支撑方式不同,获得的数据具有不同的参考价值,比如 Uhlig 法可以在腐蚀防护技术和行业方面提供宝贵数据,而 Hoar 法则可以针对不同行业的腐蚀成本进行横向对比,这些数据均可以为摸清整个国家的腐蚀成本特点及为政府制定相关政策提供重要参考,我们在腐蚀成本调查工作中,在条件允许的情况下,建议尽量通过两个方法分别进行。

第三种方法,即 Battelle-NBS 法,建立在投入产出的经济学模型理论基础之上,与 Uhlig 法和 Hoar 法区别较大,目前在各国的腐蚀成本调查研究工作中应用较少。

## 4 “我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目介绍

进入 21 世纪后我国经济持续较快发展,在 2003—2011 年间国内的生产总值年均实际增长超过 10%(中华人民共和国国家统计局 2012 年数据),这远高于世界经济同期 3.9%的年均增速。其中,在 2008 年和 2010 年分别超过了当时位居世界第三的德国和当时位居世界第二的日本,经济总量连续跨上新台阶,如今我国仅次于美国已经多年稳居世界第二大经济体<sup>[1]</sup>。

最近几年,经济结构和管理模式均发生了巨大的变化。具体到行业领域,各行业生产设备都在持续更新,生产流程也在不断优化。2013 年,以习近平同志为核心的党中央历史性地提出了“一带一路”战略,为中国的改革开放注入新的生机活力,对我国基础设施、生产制造等领域的发展提出了新的要求。其中,缺乏服役材料腐蚀防护认识,在大规模建设的同时暴露出的材料耐久性不足及设施安全性威胁,是最值得重点关注问题之一。

### 4.1 我国腐蚀成本调查涉及领域、调查形式及成员

2014 年年底开展的中国工程院环境与重大咨询项目“我国腐蚀状况及控制战略研究”是我国最近一次的腐蚀成本调查。本次腐蚀成本调查涉及基础设施、交通运输、能源、水环境、生产制造及公共事业等五大领域,涵盖铁路、机场、公路桥梁、港口码头、水利工程、建筑、船舶、飞机、轨道交通、汽车、石油天然气工业、煤炭工业、火力发电、清洁能源、城市供水、海水淡化、海水养殖、海洋平台及开发、海底管道、海洋石油装备、造纸业、化工、制药业、采矿业、冶金、电子工业、电信、家电、食品加工、文物古迹、医疗器械、农业等 30 多个行业和部门。项目通过发放问卷、实地调研、专家咨询、电话访谈、学术讨论、大会交流、查阅文献、国外考察等多种形式对我国现阶段腐蚀状况进行了深入调查。

本次腐蚀成本调查是由中国科学院海洋研究所

牵头,联合中国腐蚀与防护学会、北京科技大学、北京航空航天大学、南京水利科学研究院、中国人民解放军陆军装甲兵学院共同开展全国性的腐蚀调查<sup>[3]</sup>,成员主要为包括 30 位院士在内的 200 多位科技工作者,其中侯保荣院士担任总负责人。此外,项目进行期间也得到了中国工程院、中国科学院、中华人民共和国工业和信息化部等国家机关的大力支持,如中国工程院办公厅、中国科学院办公厅针对“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目联合发表了《关于商请协助“我国腐蚀状况及控制战略研究”项目开展调研活动的函》,号召相关单位积极组织、认真参与,协助完成好调研工作,并提出宝贵的意见和建议;工信部发出了《关于支持开展“我国腐蚀状况及控制战略研究”调研活动的函》以支持本次调研活动。由此可见,在我国经济基础设施建设快速发展的背景下,腐蚀成本调查这项工作已经得到了全国多部门的重视和大力支持。

### 4.2 我国腐蚀成本调查主要统计数据

2014 年我国的直接腐蚀损失可通过主要防腐技术所需费用来估算,具体包括:涂料和涂层、表面处理、防腐材料、缓蚀剂、防锈剂、防锈膏和电化学保护。

调研结果如表 2 所示,直接腐蚀成本总计约 10 639.1 亿元。其中,防腐涂料占比最大,为 66.15%,其次为防腐材料和表面处理费用,分别占 19.34%和 13.23%<sup>[1]</sup>。参考以往国内外腐蚀调查,间接腐蚀成本包含腐蚀诱发的产量下降、产品质量下降、环境污染、人员伤亡等因素导致的成本,间接腐蚀成本一般是直接腐蚀成本的 1 至数倍。所以保守估算,腐蚀总成本至少为 21278.2 亿元,占 2014 年中国国内生产总值(GDP)的 3.34%<sup>[1]</sup>。

表 2 主要防腐技术所需费用统计

Tab. 2 Corrosion cost statistics of major anticorrosion technologies

| 防腐技术    | 直接损失成本/亿元 | 占总费用/% |
|---------|-----------|--------|
| 涂料和涂层   | 7037.8    | 66.15  |
| 表面处理    | 1408.2    | 13.23  |
| 防腐材料    | 2058.1    | 19.34  |
| 缓蚀剂     | 50        | 0.47   |
| 防锈剂和防锈膏 | 22        | 0.21   |
| 电化学保护   | 63        | 0.6    |
| 总计      | 10 639.1  | 100    |

此外,此次调查还基于收回的调查问卷统计了基础设施、交通运输、能源、水环境、生产制造及公共事业五大主要经济领域的腐蚀成本,调研结果如表 3 所示,可见生产制造及公共事业领域占比最高,为 47%<sup>[1]</sup>。几个重点行业所占相应领域的比例的统计如图 1 所示,可见腐蚀成本最高的行业为交通运输和电子行业<sup>[1]</sup>。

表 3 主要经济领域的腐蚀成本统计

Tab. 3 Corrosion cost statistics in major economic fields

| 经济领域      | 直接损失成本/亿元 | 占总费用/% |
|-----------|-----------|--------|
| 基础设施      | 814.57    | 7      |
| 交通运输      | 2 687.2   | 24     |
| 能源        | 2 293.3   | 20     |
| 水环境       | 186.5     | 2      |
| 生产制造及公共事业 | 5 285.4   | 47     |
| 总计        | 11 266.9  | 100    |

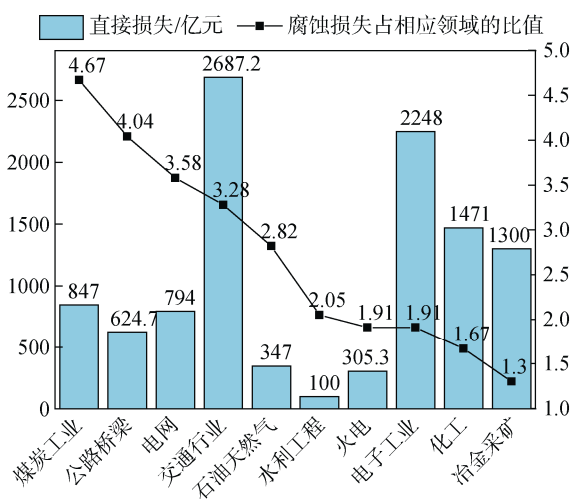


图 1 重点行业腐蚀损失及所占相应领域的比例

Fig. 1 Corrosion losses in key industries and their proportions in corresponding areas

### 4.3 我国腐蚀成本调查专著及论文成果

调查结果汇聚成一本 170 万字的《中国腐蚀成本》,该书全面系统地梳理了我国现阶段腐蚀状况和防腐蚀措施,并对行业未来发展进行了分析和展望,在国内外得到了极大关注,并被全文翻译为英文由国际出版巨头 Springer·Nature(斯普林格·自然)和科学出版社共同出版,全球发行<sup>[1-2]</sup>。美国腐蚀工程师协会(NACE International)主席、欧洲腐蚀联盟主席、日本腐蚀防护学会代表等极具影响力的同行都对该书给予了高度评价。侯保荣院士还荣获科学出版社

成立 65 周年优秀作者荣誉称号。项目同时出版《中国腐蚀状况及控制战略研究丛书》一套,含 32 部专著,该丛书是科学出版社中国工程院重大咨询项目成果文库之一,并成功入选了国家“十三五”重大出版工程规划。

此外,关于中国腐蚀成本的研究成果以“The cost of corrosion in China”为题发表在了 *Nature* 子刊 *npj Materials Degradation*<sup>[12]</sup>。

### 4.4 提高我国防腐蚀水平的建议

腐蚀防护安全关系到国家经济健康发展和国防建设长治久安,具有重要的战略意义和现实意义。为此,项目组建议将我国基础设施和重大装备腐蚀防护安全纳入国家战略,建立国家层面的腐蚀防护安全体系。

首先,要尽快着手编制基础设施及重大装备腐蚀防护指导意见和规划,将腐蚀防护安全问题纳入国家战略,使腐蚀防护成为社会共识,使我国的基础设施和重大装备走上安全防护新轨道。建议成立专门机构,定期监测重点行业及重大工程的腐蚀状况和腐蚀成本,督促相关企业或法人对重大公共设施和基础设施实施全寿命周期腐蚀控制管理,敦促相关单位成立专业团队管控和处理腐蚀问题。

其次,要加强腐蚀防护技术研究,设立国家科技重大专项,推动我国腐蚀防护技术创新发展。腐蚀防护是国民经济各行业面临的共性科学问题,应围绕我国基础设施和装备腐蚀防护重大科技问题及重大工程需求,全方位、系统性认知腐蚀破坏规律,突破腐蚀防护安全领域难点核心技术、关键共性技术。

第三,要建立健全腐蚀防护法律法规及相关腐蚀防护安全标准体系,强化腐蚀安全管理和监管力度。组建既懂防腐蚀技术又懂标准制定执行的防腐蚀标准化人才队伍,通过教育培训提高管理人员、技术人员、施工人员的防腐蚀标准化意识,以适应国内外市场规范化需求,提高各类工程防腐蚀质量。

## 5 结论

“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目是我国历史上规模最大、涵盖范围最广的一次腐蚀调研工作,同时是美国国际腐蚀工程师协会发起的全球腐蚀调研项目 The International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies 的重要组成部分。腐蚀成本相关工作占

整个项目的 20%, 80%的工作用于根据不同行业的特点, 提出相应的腐蚀防护对策和建议, 用于减少腐蚀损失。材料腐蚀广泛存在于社会的各个领域, 是广泛存在的共性问题, 各类由腐蚀引起的事故触目惊心。然而腐蚀成本调查只是一个开端, 更重要的弄清腐蚀原理, 针对性研发防腐蚀技术, 提出科学的防腐蚀对策, 这些对策不仅可以为企业提供解决方案, 节省损失, 还可以为政府部门提供相关立法建议及决策参考。

#### 参考文献:

- [1] 侯保荣. 中国腐蚀成本[M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
Hou Baorong. The Cost of Corrosion in China[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] Hou B R. The Cost of Corrosion in China[M]. New York and Beijing: Springer and Science Press, 2019.
- [3] 侯保荣, 路东柱. 我国腐蚀成本及其防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(6): 601-609.  
Hou Baorong, Lu Dongzhu. Corrosion Cost and Preventive Strategies in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(6): 601-609.
- [4] Uhlig H H. The cost of corrosion to the United States[J]. Corrosion, 1950, 6(1): 29-33.
- [5] Bhaskaran R, Palaniswamy N, Rengaswamy N S, et al. A review of differing approaches used to estimate the cost of corrosion (and their relevance in the development of modern corrosion prevention and control strategies)[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2005, 52(1): 29-41.
- [6] Hoar T P. Report of the committee on corrosion and protection – a survey of corrosion and protection in the United Kingdom[M]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1971: 7-22.
- [7] Bennett L H, Kruger J, Parker R L, et al. Economic Effects of Metallic Corrosion in the United States. Part I[J]. Washington DC: National Bureau of Standards, 1978.
- [8] Payer J H, Dippold D G, Boyd W K, et al. Economic effects of metallic corrosion in the United States. Part II[J]. Washington DC: National Bureau of Standards, 1978.
- [9] 柯伟. 中国工业与自然环境腐蚀调查的进展[J]. 腐蚀与防护, 2004, 25(1): 1-8.  
Ke Wei. Progress in public inquiry concerning corrosion in Chinese industrial and natural environments[J]. Corrosion&Protection, 2004, 25(1) : 1-8.
- [10] 侯保荣, 张盾, 王鹏, 等. 海洋腐蚀防护的现状与未来[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(12): 1326-1331.  
Hou Baorong, Zhang Dun, Wang Peng, et al. Marine corrosion and protection: current status and prospect[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(12): 1326-1331.
- [11] 魏礼群. 由经济大国到经济强国的发展战略[J]. 全球化, 2013, 6: 6-23, 125.  
Wei Liqun. Development strategy from economic power to economic power[J]. Globalization, 2013, 6: 6-23, 125.
- [12] Hou B, Li X, Ma X, et al. The cost of corrosion in China[J]. npj Materials Degradation, 2017, 1(1): 1-10.

## Study of corrosion cost and control strategy

MA Xiu-min<sup>1, 2</sup>, ZHENG Meng<sup>1, 2</sup>, XU Wei-chen<sup>1, 2</sup>, LU Dong-zhu<sup>1, 2</sup>, MA Fu-bin<sup>1, 2</sup>,  
HOU Bao-rong<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Corrosion and Biofouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Marine Corrosion and Protection Open Studio, Qingdao Marine Science and Technology Pilot National Laboratory, Qingdao 266237, China)

**Received:** Apr. 28, 2020

**Key words:** corrosion cost; statistical methods; corrosion control; economy

**Abstract:** The corrosion loss of materials has a critical negative impact on the development of the national economy; thus, the corrosion problem must be paid increasing attention. This paper reviews several major corrosion investigations at home and abroad and comprehensively interprets the statistical methods of typical corrosion cost investigations. The paper also focuses on the main contents of the major consulting project “Research on Corrosion Status and Control Strategy in China.” Corrosion and protection are a safety issue, economic issue, issue of national economy and livelihood, issue of ecological civilization, and a reflection of national civilization and prosperity. The significance of the nationwide corrosion investigation is to determine the overall situation of the national corrosion problem, provide targeted countermeasures and suggestions for corrosion protection, and provide important reference and data support for the formulation of relevant national policies.

(本文编辑: 康亦兼)