

失效分析学科的形成、发展与展望

杨振国

(复旦大学 材料科学系, 上海 200433)

摘要: 失效分析是一门多学科交叉的综合性学科, 其应用极其广泛, 特别在事故分析与预防方面具有不可或缺的作用。介绍、评述了国内外失效分析学科的形成背景和发展现状, 并对未来研究趋势进行展望。目的是让更多的专业人员深刻认识失效分析的作用和意义, 通过创新更好地应用和发展失效分析技术, 保障产品的使用安全, 从而服务于国家发展战略和国民经济建设。

关键词: 金属材料; 失效分析; 学科形成; 国内外发展现状; 未来展望

中图分类号: TB3; TG111.91; TG111.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4012(2025)02-0069-09

Formation, development and prospect of failure analysis discipline

YANG Zhenguo

(Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Failure analysis is an interdisciplinary and comprehensive discipline with extremely wide applications, especially playing an indispensable role in accident analysis and prevention. The formation background and development status of failure analysis discipline at home and abroad are introduced and reviewed, and the future research prospect of the failure analysis is also given. The aim is to help more professionals deeply understand the role and significance of failure analysis, promote its better application and development of failure analysis techniques through innovation and ensure the use safety of products, thereby serving the national development strategy and national economy construction.

Keywords: metallic material; failure analysis; discipline formation; current development status at home and abroad; future prospect

安全是产品使用的前提, 是社会发展的基石。产品在使用中可能因某些不确定因素而发生意外失效, 如设计不当、选材有误、材料缺陷、制造欠佳、安装不当、检验遗漏、操作违规、维护不妥、运输不适、存储不良、管理疏忽等。小到日常生活中使用的手机、电池、计算机等性能的衰减, 大到大型锅炉、压力容器、储罐等易燃和易爆化学品的泄漏及爆炸, 还有高技术领域使用的各种微电子器件故障, 失效现象频繁发生, 伤亡事故令人震惊, 产生了严重的社会影响。以下介绍一些典型事故案例^[1]。

切尔诺贝利核事故。1986年4月26日, 前苏联切尔诺贝利核电站4号机组突发爆炸, 质量超过8 t的强辐射物质倾泻喷出, 面积超过5万km²的土地受到严重污染, 超过320万人遭受核辐射侵害, 当场死

亡31人, 后续死亡数万人, 是迄今为止的特大核事故。事故主要原因是维护不当和设计欠佳、安全监管体制不健全, 以及缺乏政府管理部门的强制性监督措施。

博帕尔毒气泄漏事故。1984年12月3日, 美国联合碳化物公司在印度博帕尔的一家农药厂发生了异氰酸甲酯液体储罐破裂事故, 导致毒气扩散, 造成超3 150人死亡、5万多人失明。事故产生原因是维修人员违规操作, 清洗水不慎引入储罐内, 引发异氰酸甲酯液体与水反应, 导致温度升高、液体气化、压力增大, 质量不良的阀体发生泄漏, 酿成人类历史上最惨痛的特大化工事故。

哥伦比亚航天飞机事故。2003年1月16日, 美国哥伦比亚航天飞机在升空过程中, 一块包扎燃料外储箱连接管的绝热泡沫塑料意外脱落, 以约800 km/h的速率撞击航天飞机左机翼前端, 导致表面隔热陶瓷瓦片产生裂纹。2003年2月1日, 航天飞

收稿日期: 2025-01-03

作者简介: 杨振国(1958—), 男, 博士, 二级教授, 博导, 上海市教学名师, 主要从事失效分析、复合材料的研究工作, zgyang@fudan.edu.cn

机返回大气层时,因气流摩擦产生高温,导致机翼内铝合金框架熔化,在德克萨斯州上空飞机解体,机上7名宇航员全部遇难。事故产生的原因是检验疏忽、安装不良等,进而引起特大航天事故。

天津港危险品爆炸事故。2015年8月12日,天津市某公司危险品仓库发生火灾,随后发生爆炸事故,造成165人遇难、8人失踪、798人受伤,直接经济损失超过60亿元。事故产生的原因是防止硝酸棉易燃、易爆化学品升温的湿润剂缺失,且未能及时补充,使硝化棉自燃,然后硝酸铵在高温作用下发生连锁爆炸。这起事故的发生原因是管理疏漏和维护不当,反映出有关执法部门执法不严、监管不力等管理问题。

目前,国内外工程界和学术界已形成共识,认为各种失效造成的经济损失可占每个国家国民生产总值(GDP)的2%~4%,发展中国家更高些。以我国为例,2022、2023年的GDP分别为120.02万亿元和129.43万亿元,若以4%计算,2022、2023年因失效引起的经济损失分别达到4.80万亿元和5.18万亿元,均超过上海市2023年的全年GDP(4.72万亿元),可见失效带来的经济损失巨大^[2]。

对此,各国政府对失效引起的安全事故给予了高度的重视。我国先后颁布了《中华人民共和国安全生产法》(2002年11月1日)、《特种设备安全监察条例》(2003年6月1日)、《生产安全事故报告和调查处理条例》(2007年4月9日)、《中华人民共和国特种设备安全法》(2014年1月1日)、《中华人民共和国核安全法》(2018年1月1日)、《生产安全事故应急条例》(2019年2月19日)、《生产安全事故调查通用技术要求》(2024年5月10日)等。这些法律、法规的制定,旨在加强安全监管和预防,降低重大事故发生率,保障人民生命和财产安全。失效分析正是通过综合分析,找到事故产生的原因,并提出预防措施,以避免事故再次发生,保障产品的使用安全,因而具有重大的科学工程价值,会产生巨大的社会经济效益。

如果说社会发展史是一部人类不断与失败抗争的历史,那么产品和材料的发展史则是一部人类不断与失效斗争的历史。失效分析不仅能够精准剖析产品在使用过程中发生意外失效的根源,找到可行的解决对策,从而防止同类事故的再次发生,更是在新材料研发、现有材料改性、产品质量提升、制造工艺改进、可靠性提高、结构系统优化、运维策略制定、安全监督管理以及事故责任裁定等诸多方面,从理

论上指明方向,在实践上发挥独特作用,为新质生产力的培育与发展提供了有力支撑。基于此,笔者将详细梳理和评述国内外失效分析学科的形成背景与发展过程,剖析失效分析在关键领域所发挥的特有作用,并对未来研究趋势进行展望,以推动失效分析在各个领域的广泛应用,为国家经济建设和社会和谐发展贡献力量。

1 国际失效分析发展过程

1.1 失效分析形成与进展

产品一旦发生失效,需要开展原因分析和责任认定。据史料记载,早在公元前1776年,古巴比伦国王汉穆拉比编撰、颁布了世界上第一部较为完整的成文法典,即《汉穆拉比法典》。这部法典不仅是楔形文字法典中的代表作,而且对后人制定的法律体系也产生了深远的影响。该法典共有282条,其中第229条规定:如果木匠建造的房屋因质量问题而倒塌,导致房主死亡,其必须受到处死的惩罚,体现“以牙还牙”的责任对等原则。这是迄今为止已知的人类最早关于产品质量责任追究的法律条文。

真正有意义的工业产品始于第一次工业革命。早在1769年,英国詹姆斯·瓦特对矿井抽水用常压蒸汽机进行了重大改进和创新^[3],制造出世界上第一台具有广泛应用价值的动力蒸汽机,开启了第一次工业革命的序幕。随后,动力蒸汽机广泛应用于纺织、采矿、造纸、冶金、火车等工业领域,采用机械方式代替人力劳动,提高了生产力。然而,早期工业产品制造质量欠佳,各种事故随之而来,尤其是蒸汽锅炉爆炸导致人员伤亡的事故频繁发生,引起各方关注。因此,1862年,英国政府建立了世界上第一个蒸汽锅炉监察局^[4],人们依据标准和法规对蒸汽锅炉的制造质量进行监督和评定,把失效分析作为事故仲裁的法律手段和提高产品质量的技术手段,降低了锅炉爆炸事故的发生概率。1911年,美国机械工程师学会(ASME)锅炉与压力容器委员会成立,该学会制定了锅炉与压力容器的设计、材料、制造、检验等规范,并于1915年出版了世界上第一部锅炉压力容器规范,其成为ASME规范第一卷《动力锅炉》,这对提高锅炉与压力容器的制造质量、降低事故的发生概率具有重大意义。

在相同的发展时期,人们也一直关注工业产品使用中材料的疲劳与断裂问题。1825年,英国开始出现铁路交通运输业,但使用后没多久,1842年5月8日,从法国巴黎至凡尔赛铁路线发生火车头

车轴断裂事故,导致列车出轨,煤水车倾翻引起大火,约52~200名乘客死亡、数百人重伤,即凡尔赛铁路事故。为此,德国WOHLER针对火车车轴开展了一系列的疲劳试验,发现金属材料存在疲劳现象,车轴在交变载荷作用下发生了低应力疲劳开裂。1871年,WOHLER基于交变载荷作用下车轴的疲劳寿命试验结果,提出了著名的疲劳寿命估算 $S(N)$ (应力幅值)- N (疲劳寿命)曲线与疲劳极限概念,被认为是金属材料疲劳研究的奠基人^[5]。1963年,美国PARIS^[6]基于断裂力学概念,采用应力强度因子幅 ΔK 描述了裂纹疲劳的扩展规律,提出了预测疲劳裂纹扩展寿命的著名理论公式,为含裂纹构件疲劳寿命的估算提供了理论基础,由此诞生了疲劳力学学科。早在1921年,英国GRIFFITH^[7]发表了题为*The Phenomenon of Rupture and Flow in Solids*(固体中的破裂和流动现象)的著名论文,他研究了玻璃脆性材料的断裂强度,提出了裂纹失稳扩展的能量释放率 G 的概念,指出玻璃的实际断裂强度之所以远低于理论强度,原因是脆性材料存在固有的微裂纹,而含裂纹材料的断裂强度取决于裂纹长度。由此,GRIFFITH提出了裂纹失稳扩展的能量释放率 G 的判据,成为近代断裂力学的先驱。1957年,美国北极星导弹固体火箭发动机的壳体在试验发射时发生爆炸事故,壳体采用高强度钢制造。美国国防部为此组建了高强度材料脆断特别委员会,对事故原因开展调查,IRWIN在调查过程中发现导弹壳体上有裂纹。他采用Griffith能量扩展理论对含裂纹板进行分析,发现裂纹尖端附近的应力场具有奇异性,即应力在裂纹尖端趋于无穷大,而裂纹的失稳扩展是由裂纹尖端附近的应力强度因子控制的^[8],从而给出了高强度构件在低应力下发生脆性断裂的原因。由此,IRWIN提出用应力强度因子,即材料的断裂韧性作为裂纹失稳扩展准则的判据,开创了线弹性断裂力学,后来发展成为以 J 积分、裂纹尖端张开位移、能量释放率、双判据准则R6法等为判据的弹塑性断裂力学。应力强度因子及断裂力学的其他参数现今已应用于现代工程结构设计中,建立了API(美国石油学会)法、CEGB-R6(英国中央电力局R6)法、EPRI(电力研究协会)法、ASME法、英国标准协会PD-6493法及我国CVDA(压力容器缺陷评定规范)法等,成为钢结构抗断裂设计的理论基础。

疲劳与断裂学科的发展脉络清晰可辨,其历史进程与失效分析学科大致相似^[9]。然而,关于失效分析学科的形成时间,学界观点不一,至今尚未有文

献能够比较客观、全面地介绍和评述这一问题。

通常来说,一个学科体系的构成离不开4个核心要素,即基本概念、基础理论、分析方法和具体应用。要判断一个学科是否已经成熟,主要依据3个关键指标:该学科是否定期举办国际学术会议,是否出版了相关的学术专著,以及高校是否已经开设了相应的课程。基于这些要素和指标,我们可以确认失效分析学科是在20世纪70年代形成的。

1966年,美国成立了国家运输安全委员会(NTSB),负责调查分析和处理航空、海运、公路、铁路、管路5种运输方式发生的意外事故,通过对事故进行调查和失效分析,避免事故再次发生。同年,美国金属学会(ASM)发行了著名失效分析专家WULPI^[10]的培训讲义*Understanding How Components Fail*,并举办金属构件失效分析研讨会。1967年1月27日,美国阿波罗1号载人飞船发射前,在地面测试时发生特大火灾事故,导致3名宇航员不幸遇难,令世界震惊。这起事故促使美国航空航天局(NASA)对阿波罗飞船开展失效分析并查找事故发生的原因,NASA重新设计了飞船,加强了安全监管。NASA成立了机械故障预防中心,同时创建了毅博公司,专注于航空航天装备的事故调查和失效分析,以提高系统、设备和构件的安全可靠性。1990年8月17日,毅博公司以失效分析和第三方检测为主营业务的公司在美国纽约纳斯达克证券交易所成功上市,证明了失效分析的重要性及其价值,得到了公众的广泛认可。在同一时期,美国军方开展以失效分析为中心的电子元器件质量保证计划,针对制造和试验中暴露的问题,采用失效分析的方法找出原因,改进设计和工艺,使集成电路的失效率从 7×10^{-5} 次/h极大地降低到 3×10^{-9} 次/h^[11],下降了整整4个数量级,最终阿波罗11号载人飞船在1969年7月20日成功登上了月球,失效分析发挥了至关重要的作用。

ASM经过8 a多的深入研究和实践,于1974年10月在加州圣迭戈举办了首届国际测试与失效分析会议(ISTFA),这一创新举措预示着失效分析领域迈入了一个新的时代,为国际学术交流与合作奠定了基础。1975年,ASM在《金属手册》第8版中出版了《第10卷:失效分析与预防》^[12]。这一卷的编纂,是以1948年出版的《金属手册》中“服役失效”章节为蓝本,超过70位专家学者凭借各自在失效分析领域的深厚造诣,对各个主题进行深入地补充、扩展和编写,最终形成了一部综合性的专业手册。这部手册被认为是全球首部全面介绍失效分析与预防领

域的权威指南,亦是一部集大成的工具书。随后,美国、英国、德国等西方国家的大学纷纷开设了失效分析课程,标志着失效分析作为一门独立学科正式诞生了。

非金属材料,包括聚合物、陶瓷、复合材料、电子材料等,在现代工业中也扮演着越来越重要的角色,其安全性同样引起了人们的关注。因此,ASM在《金属手册》中增补出版了非金属材料的制备、加工、性能、分析、应用等多卷。特别是随着半导体材料和微电子器件的大量应用,其安全性和可靠性更引起学术界、工程界的重视。失效分析通过逆向思维分析,查明了影响可靠性的材料、工艺等相关问题,通过改进材料配方、组装工艺和封装等方式,提高了微电子器件的可靠性及其产品质量。因此,在1998年举行的第25届国际测试和失效分析会议上,会议指导委员会经过讨论,向ASM理事会提出建议,成立了一个新的失效分析组织“电子器件失效分析分会”。1999年,美国出版了《电子失效分析手册》^[13],满足了印制电路板、微电子器件领域对失效分析的迫切需求。因而,ASM在后续举行的一系列国际测试和失效分析会议中,将主题更多地集中在半导体和微电子器件的失效分析及其测试方法上。ASM鉴于《金属手册》的名字已不能恰当反映所有材料的失效分析,因而于2021年,在总计24卷系列丛书更新版中,把《金属手册》更名为《美国金属学会手册》,把2002年版《第11卷(第10版):失效分析与预防》更新为《第11卷(第11版):失效分析与预防》^[14],同时新增了第11A《构件和设备失效的分析与预防》^[15]和第11B《塑料的表征与失效分析》^[16]两卷,前者介绍了金属构件的失效分析,后者介绍了塑料构件的失效分析。其中,第11B卷取自于ASM在2003年出版的《塑料的表征与失效分析》和1988年出版的《工程材料手册》第2卷的大部分内容,经过适当补充、修订后,最终在2022年以单独一卷的形式出版。诚然,塑料失效分析相较于金属失效分析来说,还处于早期阶段,所以第11B卷大部分篇幅主要介绍了塑料的表征分析、基本性能、降解机制、材料选择和制品设计等方面,在这些内容的基础上,最后两个部分专门阐述了塑料的失效分析及其预防措施。

当今国际学术界把研究材料与构件失效行为的“Fatigue, Fracture and Failure Analysis(疲劳、断裂、失效分析)”3个学科合为一体,统称为“3F”。于是,美国、英国、德国等发达国家已在一些大学设立了

“3F”实验室。这清楚地表明,失效分析学科在国际学术界获得了广泛认可。

1.2 国际失效分析学术会议

当今,国际学术界以“失效分析”为主题词,分别举行了3种类型的国际失效分析学术会议。

Elsevier(爱思唯尔出版集团)与《工程失效分析》期刊合作,每2 a举行一次“国际工程失效分析会议(ICEFA)”。该会议涵盖了各种工程材料与结构的失效分析、分析方法和案例研究,被认为是国际失效分析领域学术水平最高、影响力最大的国际会议。自2004年7月在葡萄牙里斯本举行首届会议以来,目前已成功举办了10届。第11届国际工程失效分析会议将于2026年7月在上海举行,这是我国首次主办线下的国际工程失效分析会议。复旦大学杨振国教授继2022年担任线上举行的第9届国际工程失效分析会议大会主席之后,将再次出任第11届会议大会主席。此外,他还连续两届受邀在第9届和第10届国际工程失效分析会议做大会主旨报告^[17-18]。

美国材料信息学会(ASM International)每年主办“国际测试与失效分析研讨会(ISTFA)”。自1974年10月在美国圣迭戈举办首届会议以来,该国际会议仅在美国各地举行。2024年10月,第50届会议再次在圣迭戈举办,并举行了盛大的50周年庆典纪念活动。会议内容从最初关注金属构件的失效分析,拓展到现在以微电子器件为主的失效分析及其测试方法。

美国电气和电子工程师学会(IEEE)主办了“国际集成电路物理与失效分析会议(IPFA)”。首届会议于1987年7月在新加坡金沙会展中心举行,专注于微电子器件及半导体材料的物理分析和失效分析。最初10 a,该会议每3 a举办一次,但随着参会人数的不断增多,自2003年起改为每年举办一次,如今已举办了31届。其中,我国曾在苏州(2009、2013年)、成都(2017年)和杭州(2019年)承办过4次。

此外,与失效分析相关的国际学术会议也有不少,如:“国际工程防失效会议(ICEAF)”,“断裂力学国际会议(ICFM)”,“疲劳与断裂国际会议(ICFF)”,“国际腐蚀大会(ICC)”,“国际材料磨损会议(ICWM)”,“国际断裂疲劳与磨损会议(ICFFW)”,“复合材料疲劳国际会议(ICFC)”,“国际断裂与损伤力学会议(ICFDM)”,“系统可靠性与安全国际会议(ICSR)”,“结构完整性国际研讨会(ISSI)”,“可靠性、可维护性和安全性国际会议

(ICRMS)”等。这些会议部分内容也涉及失效形式、失效机制、计算模拟等内容,分享了最新的研究成果和学科动态,为拓展失效分析领域提供了信息和方法,促进了学科间的学术交流。

1.3 失效分析国际期刊

在失效分析学科的形成、发展过程中,以失效分析为刊名的几本国际期刊也随之诞生。1994年,Elsevier与欧洲结构完整性学会合作,联合创办了国际失效分析界第一本SCI期刊*Engineering Failure Analysis*。该期刊主题范围涵盖各个领域的失效分析、分析方法、仿真模拟和案例研究,学术影响力大,成为现今国际失效分析界公认的顶级期刊。我国学者近3 a论文贡献量最多,发表数占该期刊论文总数的一半以上,其中复旦大学失效分析课题组以论文总数43篇目前名列第一。2024年6月,世界知名的科睿唯安公司在每年出版的国际SCI期刊引用报告(JCR)中显示,*Engineering Failure Analysis*在“材料科学:表征与测试”小类列为一区(Q1)、在“工程:机械”小类也列为一区(Q1),说明其学术影响力越来越大。2001年,ASM International创刊*Journal of Failure Analysis and Prevention*,同时面向微电子器件失效分析创刊*Electronic Device Failure Analysis*。这两本失效分析专业期刊也引起广泛关注,为国际失效分析界提供了学术研究和探讨的交流平台。2013年,Elsevier还出版开放获取SCI期刊*Case Studies in Engineering Failure Analysis*,前后出版了9卷。2018年,该期刊与Cell Press旗下一本综合性跨学科开放获取SCI期刊*Heliyon*合并,完成了其短暂且有意义的历史使命。

还有,更早些出版的其他一些国际期刊,也刊登了与失效分析相关的案例研究、安全评定、可靠性分析等研究论文,比如*International Journal of Fatigue*、*Engineering Fracture Mechanics*、*Theoretical and Applied Fracture Mechanics*、*Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*、*Journal of Loss Prevention in the Process Industries*、*Accident Analysis and Prevention*、*Materials and Corrosion*、*Microelectronics Reliability*、*IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*、*IEEE Transaction on Reliability*、*Reliability Engineering & System Safety*、*Safety Science*等。这些期刊从不同角度,推广、应用了失效分析的技术和方法,起到学科间相互融合和互补促进的作用。

2 国内失效分析发展历程

2.1 失效分析的早期发展

我国的失效分析研究起步较晚,但发展迅速。1970年前后,我国工业产品的制造水平和产品质量存在一定的局限性,失效发生率相对较高,这一现象引起国内不同行业专家的重视。在这一背景下,我国学者开始学习、研究断裂力学,并取得进展。北京钢铁研究总院陈箴研究员和蔡其珉院士等科研人员应用断裂力学方法,开展了高强度钢断裂机制分析,以指导、开发强度与韧性相匹配的高性能合金钢。

1974年,在南京召开的材料金相学术研讨会上,我国学术界第一次设立了失效分析分会场^[19],恰好与ASM举行的第一届国际测试与失效分析会议同年,反映出中外学者对失效分析的同步关注。1978年,中国机械工程学会在杭州筹建材料分会,西安交通大学周惠久院士、中国机械科学研究院张协和院长、上海材料研究所陶正耀总师等联合发起倡议,组织力量开展失效分析研究。1980年12月,在北京召开了第一次全国机械装备失效分析会议暨材料分会成立大会。这一会议不仅征集到311篇交流论文和案例^[20-21],更标志着我国在失效分析领域正式起步和组织发展,开启了中国失效分析研究的新篇章。然而,由于当时经济条件的限制,首届会议的交流论文并未汇编成册,而是以各单位自行印刷的形式在会上分发,因此未能留下论文集这一历史性的见证。尽管如此,材料分会在中国机械工程学会的委托下,继续于1984年在杭州召开第二次、1988年在广州召开第三次、1993年在桂林召开第四次全国机械装备失效分析会议,这些会议的交流论文均被编制成论文集,总计召开了4次。材料分会还投入近10 a的时间,邀请众多领域的专家撰写、出版了影响深远的“机械产品失效分析丛书”,共计11本^[22-32],为我国失效分析领域的发展做出了不可磨灭的贡献。

在20世纪80年代至90年代,国内许多专家纷纷投身于失效分析领域的研究与著述,还陆续出版了30多本相关书籍、手册及教材^[33-65]。这些作品为我国失效分析的早期应用和推广奠定了坚实的基础,发挥了重要的作用。与此同时,中国电子学会也积极整合力量,着手开展电子产品的失效分析工作,1980年在上海举办了电子产品失效分析研讨会,会上探讨和交流了失效分析技术,推动了失效分析在我国电子领域的应用。自2000年以来,随着失效分析技术的不断进步,各行业对失效分析的重视程度

日益提高,众多行业的专家纷纷投身于失效分析著作的撰写。他们结合自身丰富的行业经验和专业知识,撰写了不同领域的失效分析书籍。至今,又出版了70多本失效分析及可靠性分析的相关书籍,我国目前已出版超过100本这方面的专业书籍。这些书籍涵盖了众多领域,为失效分析在不同领域的应用提供了理论指导和实践参考,推动了失效分析技术的发展和运用。

鉴于失效分析工作的重要性、紧迫性和广泛性,中国机械工程学会于1986年8月成立了中国机械工程学会失效分析工作委员会,由我国失效分析领域的开拓者之一、北京航空航天大学钟群鹏院士担任主任委员,随后不定期组织召开了机电装备失效分析预测预防战略研讨会^[66-68]。受中国科协的委托,全国22个一级学会分别于1987、1992、1998年联合举办了全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会。3次研讨会的组织规模大、涉及领域广、参会人数多、学术影响力大,大大促进了我国不同行业失效分析工作者之间的学术交流、成果分享和案例分析。1993年,中国机械工程学会失效分析工作委员会更名,正式成立了中国机械工程学会失效分析分会,钟群鹏院士出任第1届和第2届主任委员,中国的失效分析工作者自此拥有了自己的官方组织。1995年6月,北京航空航天大学还与ASM、中国航空学会、中国科协工程学会联合会失效和预防中心合作,在北京联合举办“1995国际失效分析与预防学术会议”^[69],从而推动了我国失效分析界与ASM、国际失效分析界之间的联系、交流和合作。

2.2 失效分析的现代发展

失效分析如此重要、应用如此广泛,因而很有必要加强不同行业之间的学术交流与合作,更好地为国家经济建设服务。为此,钟群鹏院士、李鹤林院士、中国机械工程学会原副理事长兼秘书长宋天虎教授和上海材料研究所原所长蔡安定教授联合发起倡议,由中国机械工程学会失效分析分会与理化检验分会合作,面向所有行业每2 a举办一次全国失效分析学术会议,主题涵盖了失效分析基础理论和方法、理化检验检测技术、失效分析与预防研究成果、失效分析技术与经验、失效分析学科发展战略、不同行业失效案例分析等,因而该会议是我国失效分析界高水平、高规格的学术交流会。每次会议论文集由《理化检验-物理分册》、《金属热处理》、《机械工程材料》等行业期刊在会前出版。自2005年在广州举办了第1届全国失效分析学术会议以来,分别在长沙(2007年)、

上海(2009年)、西安(2011年)、大连(2013年)、北京(2015年)、无锡(2017年)、青岛(2019年)、杭州(2023年)等地举行,目前已成功举办了9届。

自1993年起,中国航空学会举办了面向航空航天领域的全国航空航天装备失效分析研讨会,每3 a举行一次,迄今已举办了10届。1994年6月,中国航空学会批准成立了航空航天领域的失效分析专业分会,现正名为失效分析分会。2006年,南昌航空大学与北京航空材料研究院合作,共同创办了《失效分析与预防》期刊,这是我国第一本以“失效分析与预防”为刊名的专业期刊,主要目的为反映我国失效分析与预防方面的技术成果,促进国内外学术交流,培养高科技人才,提高我国失效分析的理论与技术水平。

中国体视学学会着眼于未来失效分析专业人才的培养和学科发展的需要,于2016年创办了全国失效分析大奖赛。该赛事以本科生和研究生为主体,内容丰富,题材广泛,备受关注。大赛涵盖了核电、高铁、航空、汽车、火电、风电、石油、化工、石化、天然气、土木、冶金、船舶、微电子、印制电路、医疗、军工及先进材料等18个行业的失效案例分析。通过这一平台,学生们综合运用材料科学基础知识和分析方法,解决工程实际问题,从而提升了自身的综合能力、创新能力和专业素养。首届全国失效分析大奖赛于2016年12月在上海复旦大学举行,每年举行一次,迄今已举办了9届。2025年8月,北京航空航天大学将举行第10届全国失效分析大奖赛,该赛事将被中国机械工程学会和国家教育部批准为“中国大学生机械工程创新创业大赛-失效分析赛”的“国赛”。这是我国失效分析领域又一重大事件,必将对培养、提高我国失效分析专业人才的创新能力和综合能力起到很好的促进作用。

与此同时,我国其他一些学会,如中国力学学会、中国电子学会、中国腐蚀与防护学会、中国复合材料学会、中国印制电路行业协会等,在各自学科范围内也不定期地举办与失效分析有关的学术研讨会或论坛会,反映出不同学科都非常重视失效分析的研究、应用和发展。

目前,我国已有超过80所高校为本科生和研究生开设了失效分析相关课程,这为我国在该领域的高端专业人才培养做出了重要贡献。其中,复旦大学开设的《材料失效分析》课程获评为上海市精品课程、上海市课程思政示范课程、复旦大学本科优质课程、复旦大学课程思政示范课程和复旦大学标杆课。这些课程不仅普及了失效分析的基础知识,丰

富了学术资源,还为我国在这一领域的深入发展及其人才培养奠定了基础。通过失效分析课程设置,学生能够系统地学习失效分析的基本概念、基础理论、分析方法及其案例剖析,通过理论与实际相结合,提升了解决工程问题的能力,可为不同行业输送大量具备实践能力的专业人才。

通过失效分析发展历程的简要回顾,我们可以清晰地看到,尽管我国在该领域起步较晚,但发展迅速,呈现出后来居上的态势。无论是在组织形式、发展规模,还是在研究水平、技术能力方面,我国都具有特色,成就显著,获得国外同行的赞赏,并享有较高的学术地位。特别是我国举办的各种类型失效分析学术会议、研讨会和大奖赛,为跨学科间的学术交流与发展提供了重要平台,促进了产、学、研的深度融合与合作,有效提升了专业技术人员的技术能力和水平,推动了失效分析的普及和应用。这使得更多人员能够运用失效分析技术来解决工程的实际问题,更好地服务于国家发展战略和国民经济建设。通过创新驱动,失效分析不仅可以服务于新质生产力,而且可以提出预防措施,以防止同类事故重复发生,从而为社会的稳定发展起到保驾护航的作用。

3 失效分析未来展望

3.1 仿真模拟技术

随着人工智能(AI)、机器学习(ML)等技术的快速发展,机器自我学习的能力不断提高,智能失效分析可以应用于常规失效分析中,其在失效模式识别、数据预处理、故障诊断与预测、性能检测与评价、寿命预测与评估、可靠性分析与评定、失效预防方法等方面展现出很大的潜力,可以提高失效分析效率。人机结合的智能失效分析法有利于基于大数据的人工智能失效分析,但如何确保复杂因素引起的失效原因分析、失效机理鉴别及材料性能评价等方面的正确性和可靠性,有待深入研究和研发。

3.2 失效机理鉴别

随着现代科技的进步,众多新材料被广泛应用于各个工程领域。然而,当今人们对这些新材料在微观层面上失效机理的认识还是比较粗浅。失效机理的识别涉及材料、力学、物理、化学、工程学等多学科的综合知识和研究能力,其正确判别有助于找到失效原因,提出有效的预防措施。对此,必须结合现代分析仪器及其检测技术,对新材料在不同工况下的损伤行为进行深入探究。在细观、微观、纳观等多个尺度下,结合形态和成分分析,揭示出材料的损

伤起源及其演变过程,从而为预防构件的意外失效提供理论指导。这不仅有助于实现失效的可预防性,还使材料使用寿命的预测成为可能。

3.3 极端工况分析

为了提高生产效率,一些特种设备与构件是在极端条件下运行的,材料可能经历高温蠕变疲劳的交互作用、强辐照高温和高压的相互作用、高速和高载摩擦磨损的复合作用、多种腐蚀介质的复杂腐蚀作用等。需要对该类多因素作用下的材料进行失效过程、损伤行为和模拟方法等多尺度的分析,查明失效原因,并开展精准的预测预防,为极大尺寸设备与构件的设计、制造、选材等提供技术支撑,确保其运行的安全性和可靠性。

3.4 微纳缺陷定位

信息电子产品的基本特征是轻、薄、短、小,从而实现微电子器件的高性能化和轻量化。由于导电线宽及其焊盘尺寸变得极其微小,尺度在微纳米以下,常规无损检测技术已不再适用,故需要开发高效的微纳X射线显示技术、扫描透射电子断层成像技术、激光热效应与电光频率映射技术,以及其他光电结合的智能分析技术等,实现对微电子器件中缺陷的精确定位,并对缺陷的产生原因进行分析。

3.5 仪器设备开发

随着材料工艺与技术的进步,越来越多的非金属材料代替金属材料应用于工程实际中,在使用过程中,材料出现的性能劣化与老化等安全问题逐渐显现。需要对材料的化学组成、元素价态、官能团、微结构、相组织、界面形态等变化过程进行精准检测和识别,因而高检测精度、高分辨率、高智能化的非金属材料分析检测仪器亟待研制和应用。

3.6 在线监测方法

防止突发性事故发生的一个重要前提是,对设备与构件在使用中发生损伤及其演变能够预先监测和数据采集分析,故需要研发适用于实际工况下可用的、高精度的在线动态监测仪器,做到安全隐患早发现、早预防、早处理,这不仅需要技术上的创新,还需要高性能在线监测仪器的综合应用。

3.7 促进社会进步

失效分析与社会安全息息相关。一方面,需要普及失效分析的知识和方法,提高公众的安全意识和素养,尽可能避免类似事故的重复发生;另一方面,需要将失效分析作为一种有效的分析工具,嵌入到各级的法规、条例、规范、规程、手册和标准中。失效分析的目的是防止设备与构件重复失效,保障

安全生产和生产安全,从而促进社会的和谐发展。

致谢: 本文撰写过程中,北京航空航天大学钟群鹏院士通过他的秘书有移亮副教授,提供了他在2022年8月16日撰写完成的、未公开的“失效分析预测预防技术开拓纪实”手稿。作者在“2.1失效分析的早期发展”第一段中参考了他的手稿内容,对钟老师给予的无私帮助和支持表示由衷的感谢!

参考文献:

[1] 钟群鹏,张峥,有移亮. 安全生产(含安全制造)的科学发展若干问题的探讨[C]//2006年全国失效分析与安全生产高级研讨会论文集. 北京,2006:14-29.

[2] 杨振国. 失效分析学科进展及其工程应用[C]//2024中德失效分析及安全评价学术会议(大会特邀报告). 常州,2024:2.

[3] 王铮译. 瓦特传:工业革命的旗手[M]. 南昌:江西教育出版社,2012.

[4] 张栋,钟培道,陶春虎,雷祖圣. 失效分析[M]. 北京:国防工业出版社,2004.

[5] ELLYIN F. Fatigue damage, crack growth, and life prediction[M]. London: Chapman & Hall, 1997.

[6] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533.

[7] GRIFFITH A A. The phenomenon of rupture and flow in solids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1921, A221: 163-198.

[8] IRWIN G R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate [J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 24(3): 361-364.

[9] 周惠久,顾海澄. 从国外动向看失效分析在经济建设中的重要性[C]//中国机械工程学会材料分会失效分析论文集. 北京,1983:1-6.

[10] WULPI D J. Understanding how components fail [M]. Metals Park: ASM, Ohio, 1985.

[11] 孔学东,恩云飞. 电子元器件失效分析与典型案例 [M]. 北京:国防工业出版社,1983.

[12] BOYER H E. Metals Handbook 10: Failure Analysis and Prevention[M]. Metals Park: ASM, Ohio, 1975.

[13] MARTIN P.L. Electronic Failure Analysis Handbook [M]. McGraw-Hill Companies, Inc., 1999.

[14] MILLER B A, SHIPLEY J, PARRINGTON R J, DENNIES D P. ASM Handbook 11: Failure Analysis and Prevention[M]. Metals Park: ASM International, Ohio, 2021.

[15] MILLER B A, SHIPLEY J, PARRINGTON R J, DENNIES D P. ASM Handbook 11A: Analysis and

Prevention of Component and Equipment Failure[M]. Metals Park: ASM International, Ohio, 2021.

[16] MENNAT T J. ASM Handbook 11B: Characterization and Failure Analysis of Plastics[M]. Metals Park: ASM International, Ohio, 2022.

[17] YANG Z G. New interpretations of materials failure analysis and its engineering application[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Engineering Failure Analysis (Keynote lecture), Shanghai, 2022: 5.

[18] YANG Z G, JIANG T H. Re-understanding of the space shuttle challenger explosion: importance of polymer failure analysis[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Engineering Failure Analysis (Keynote lecture), Athens, 2024: 3.

[19] 陈南平. 前言[C]//中国机械工程学会全国第四次机械装备失效分析论文集. 桂林,1993,3.

[20] 陶正耀. 序言[C]//中国机械工程学会.中国机械工程学会全国第二次机械装备失效分析论文集. 杭州,1984,10.

[21] 吴民达. 序言[C]//中国机械工程学会全国第三次机械装备失效分析论文集. 广州,1988,5.

[22] 中国机械工程学会材料学会主编(鹿鹏、栗滋). 机械产品失效分析丛书(基础1)——机械产品失效分析和质量管理[M],北京:机械工业出版社,1986.

[23] 中国机械工程学会材料学会主编(钟群鹏、田永江). 机械产品失效分析丛书(基础2)——失效分析基础知识[M]. 北京:机械工业出版社,1990.

[24] 中国机械工程学会材料学会主编(刘民治、钟明勋). 机械产品失效分析丛书(基础3)——失效分析的思路与诊断[M]. 北京:机械工业出版社,1993.

[25] 中国机械工程学会材料学会主编(广鹏). 机械产品失效分析丛书(基础4)——疲劳失效分析[M]. 北京:机械工业出版社,1990.

[26] 中国机械工程学会材料学会主编(刘英杰、成克强). 机械产品失效分析丛书(基础5)——磨损失效分析[M]. 北京:机械工业出版社,1991.

[27] 中国机械工程学会材料学会主编(陈南平). 机械产品失效分析丛书(基础6)——脆断失效分析[M],北京:机械工业出版社,1987.

[28] 中国机械工程学会材料学会主编(冯晓曾、何世禹). 机械产品失效分析丛书(零件1)——模具的失效分析[M]. 北京:机械工业出版社,1987.

[29] 中国机械工程学会材料学会主编(苏德达、李忆莲). 机械产品失效分析丛书(零件2)——弹簧的失效分析[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

[30] 中国机械工程学会材料学会主编(王大伦、赵德寅). 机械产品失效分析丛书(零件3)——轴及紧固件的失效分析[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

[31] 中国机械工程学会材料学会主编(郭志德、邵尔玉). 机

- 械产品失效分析丛书(零件4)——齿轮的失效分析[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [32] 中国机械工程学会材料学会主编(张文钱). 机械产品失效分析丛书:焊接工艺与失效分析(工艺1)[M].北京:机械工业出版社,1989.
- [33] 上海交通大学编写组.金属断口分析[M].北京:国防工业出版社,1979.
- [34] 中国电子学会电子产品可靠性与质量管理专业学会.失效分析讨论会论文集[C]//中国电子学会论文集.上海,1980.
- [35] 郑文龙.金属构件断裂分析与防护[M].上海:上海科学技术出版社,1980.
- [36] 卢其庆,张安康.半导体器件可靠性与失效分析及其应用[M].南京:江苏科学技术出版社,1981.
- [37] 德意志联邦共和国 Allianz 中心著,栗滋译.机电设备失效预防手册[M].北京:国防工业出版社,1983.
- [38] “图谱”编审组.电子材料与器件失效分析显微组织图谱[M].北京:中国标准出版社,1985.
- [39] 美国金属学会主编,中国机械工程学会译.金属手册-第十卷-失效分析与预防[M].北京:机械工业出版社,1986.
- [40] 陈君才.金属构件的失效分析[M].成都:成都科技大学出版社,1987.
- [41] 盐见弘,久保阳一,高桥洽太郎著,陈祝同译.失效分析及其应用[M].北京:机械工业出版社,1988.
- [42] 国家机械工业委员会(统编).失效分析[M].北京:机械工业出版社,1988.
- [43] 陈南平.机械零件失效分析[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [44] 胡世炎.机械失效分析手册[M].成都:四川科学技术出版社,1989.
- [45] 钟群鹏,田永江.失效分析基础[M].北京:机械工业出版社,1989.
- [46] 侯公伟.金属材料及其缺陷和失效分析100例[M].北京:机械工业出版社,1990.
- [47] 吴连生.机械装备失效分析图谱[M].广州:广东科技出版社,1990.
- [48] 洛阳矿山机械厂,中国机械工程学会重载齿轮专业委员会.重载齿轮损伤与失效图谱[M].北京:中国科学技术出版社,1990.
- [49] 何德芳.失效分析与故障预防[M].北京:冶金工业出版社,1990.
- [50] 航空航天失效分析中心.金属材料断口分析和图谱[M].北京:机械工业出版社,1990.
- [51] 杨道明.金属力学性能与失效分析[M].北京:冶金工业出版社,1991.
- [52] 王富岗,王来.石油化工装置失效分析论文选集[M].大连:大连理工大学出版社,1991.
- [53] 吴望周.化工设备断裂失效分析基础[M].南京:东南大学出版社,1991.
- [54] 邓永孝.半导体器件失效分析[M].北京:宇航出版社,1991.
- [55] 郭志德.齿轮的失效分析[M].北京:机械工业出版社,1992.
- [56] 王学颜,宋广惠.结构疲劳强度设计与失效分析[M].北京:兵器工业出版社,1992.
- [57] 刘尚慈.火力发电厂金属断裂与失效分析[M].北京:水利电力出版社,1992.
- [58] 许风和.航空非金属材料失效分析[M].北京:科学出版社,1993.
- [59] 涂铭旌.机械零件失效分析与预防[M].北京:高等教育出版社,1993.
- [60] 朱敦伦.机械零件失效分析[M].徐州:中国矿业大学出版社,1993.
- [61] 张栋.机械失效的痕迹分析[M].北京:国防工业出版社,1996.
- [62] 张栋,钟培道,陶春虎.机械失效的实用分析[M].北京:国防工业出版社,1997.
- [63] 夏泓.电子元器件失效分析及应用[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [64] 徐佩弦.塑料件的失效[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [65] 李平全.石油钻柱失效分析与预防[M].大连:大连理工大学出版社,1999.
- [66] 中国科学院.第一次全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会论文集[C]//北京,1987,12.
- [67] 中国科学院.第二次全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会论文集(上、下册)[C]//北京,1992,12.
- [68] 钟群鹏主编.第三次全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会论文集[C]//北京,1998,10.
- [69] CHEN C Q, CHATURVEDI M C. Proceedings of international conference on failure analysis and prevention[C]//Beijing: International Academic Publishers, 1995.