

金属材料在工业应用中面临的挑战与应对——材料服役安全大科学设施介绍

The Challenges and Responses Faced by Metal Materials in Industrial Applications: Introduction to Major Scientific Facilities for Material Service Safety

供稿|梁治国 / LIANG Zhiguo

内容导读

材料作为人类改造世界的物质基础，在人类社会的每个阶段都对经济社会发展起着决定性作用。金属材料因其优越的结构与性能，在当今世界中依旧是主要的结构材料和重要的功能材料。随着工业产品与工程设施越来越呈现出尺度超大化、工况环境极端化等特点，对其中关键核心材料的服役性能提出严峻挑战。为了应对这一挑战，以服务于国民经济核心战场的国家重大科技基础设施——重大工程材料服役安全研究评价设施建立实施，为推动关键行业领域材料服役性能评价提供了有效的技术与装备条件。通过突破大尺寸超大荷载下多场耦合等一大批核心技术，建成6套大型实体科学装置群和2套支撑系统，对国家和行业重大需求的重要支撑推动作用日益显现。

金属材料在我国社会主义建设过程中，始终起着至关重要的作用。时至今日，金属材料作为最主要的结构材料和重要的功能材料，依旧持续不断发挥着重要的推动作用。核电火电、石油石化、道路交通、市政设施等都以前所未有的速度被建造并投入使用，核心关键部件如果出现严重的材料失效，可能会导致灾难性的后果和巨额的经济损失，而重大装备和工程设施的核心零部件往往采用金属材料加工制造而成，材料及构件服役性能的可靠性评价

与提升将成为一个工业制造部门必须积极解决的重大共性问题^[1]。

金属材料使用过程中面临的工程挑战

金属材料具有光泽性强、延展性好、容易导电、传热性佳等性质。根据元素周期表金属可以分为碱金属、碱土金属、镧系元素、锕系元素等；根据市场价值金属可以分为：贵金属、贱金属、稀有金属等；而在工业领域，一般分为黑色金属和有色

金属两种。黑色金属包括铁、铬、锰等，其中钢铁是基本的结构材料，称为“工业的骨骼”，随着科学技术的进步，各种新型化学材料和新型非金属材料的应用，使钢铁的代用品不断增多，对钢铁的需求量相对下降。根据应用场景和所起的作用分类，金属可以分为金属结构材料和金属功能材料，金属结构材料主要是用于支撑、传递和承载负载，在应用场景中侧重于发挥其力学性能，而金属功能材料更侧重于在实际应用场景中所具有的独特性质和功能，比如导电、导热、磁性等。

金属结构材料

我国国民经济处于高速发展阶段，超大型海上油气平台、西气东输工程、超大型桥梁、高铁列车与轮轨、国产新一代核电站等一大批重大装备与重大战略工程设施相继建设和投入运行。大量装备和工程设施的主结构以及关键核心结构、传动部件基本上都是金属材料，不难看出，尺寸大型化、结构复杂化、服役环境极端化、失效形式多样化几乎成为各行业必须面对的严峻挑战。由于在很多工业领域，我国走的是“引进—消化—吸收—再创新”的发展路径，核心关键材料和部件的制造技术往往依靠国外进口，随着我国制造业发展的自主可控要求不断明确以及很多超级工程的启动建造，核心材料和设计数据越来越难以通过国际合作获得，而且很多工况环境与载荷要求，国外也没有先例，必须由我国企业来自主解决制约我国先进材料开发和高端装备核心部件制造的瓶颈问题。聚焦核心零部件制造开发环节，我国的材料设计和加工制造技术往往还是以传统实验室小尺寸标准试样在单一或简单实验环境中获取的服役性能数据作为设计依据。由于金属材料的各向异性，真实的结构性能存在显著的尺寸效应，尤其是实际服役工况是一个复杂的力学、化学等多因素耦合环境，大尺寸材料或全尺寸构件、装备在实际服役工况多因素耦合作用环境下，将呈现出与传统实验室标准材料试样不同的失效行为规律。在实际工程中，金属结构材料或构件往往结构形式复杂多样，很多重型装备核心关键部件都需要将不同尺寸、不同性质的工程材料或构件连接在一起，构成更大的或者整体性的结构。因此工程

材料的种类、尺寸，构件的几何形式，构件的连接方法等对工程材料的服役性能、使用寿命都将产生重要的影响。工业产品从设计开发到工业规模化生产，整个链条存在着很多影响因素，致使出现设计寿命与实际寿命严重不符的情况，这将导致金属部件因存在安全风险而缺乏真实的服役性能数据而无法顺利投入使用^[2-4]。

金属功能材料

金属功能材料过去是金属材料的一个小分支，但是，近年来，随着全球功能材料研究的飞速发展，金属功能材料也有了重要进展，已经成为一类不可忽视的功能材料。它们包含金属磁性材料、金属能源材料、金属催化材料、形状记忆合金和机敏金属材料、金属电子材料等。聚焦应用环节，金属功能材料往往需要面向全新应用场景和需求，开展新型功能的研发与产品化，虽然相对于结构材料而言，其结构承载能力不作为其主要性能，但如果功能材料在实际服役过程中出现结构性失效，无法正常实现其设计功能，将给整个部件甚至装备设施带来巨大的风险和事故隐患。随着先进功能材料和先进制备技术的发展，金属功能材料也逐步呈现出材料—结构—功能一体化的开发制备趋势，材料构件的构型、内应力分布、材料成分的均匀性以及杂质的分布等也将对工程材料的服役性能、使用寿命以及实际强度产生重要影响^[5-6]。尽管常规标准材料试样的服役性能数据有一定的科学技术价值，但大量事实表明它不足以作为评价工程材料或构件的性能依据^[7]。

金属功能材料的服役过程受到应力应变场、温度场、化学环境场、电场、磁场等多场耦合作用，实验室单一环境或简单环境与实际服役工况环境存在一定的差别，简单环境和复杂多因素耦合环境下功能材料服役性能的时变特性表现不一，随时间的变化规律不尽相同。依据简化条件和基于简单环境试验所建立的失效理论往往难以描述多场耦合作用下失效规律和失效机理。

重大工程材料服役安全研究评价设施建设与运行情况

针对重大工程材料服役安全评价这一重大问

题，国家发改委积极探索大科学装置服务国民经济发展的新模式，批复由北京科技大学牵头建设国家重大科技基础设施“重大工程材料服役安全研究评价设施”。该项目是首个直接面向国民经济主战场的大科学设施，同时也是首个教育部直属高校牵头承建的大科学设施。项目建设地点位于北京市昌平区未来科学城，于2022年11月通过了国家验收，现已全面投入运行。图1是设施正门俯瞰图。



图1 国家材料服役安全科学中心正门及主楼俯瞰图

项目建设团队坚持“团结务实、科学管理、专家决策、集智创新”的理念，面向国家战略与行业重大需求，经过数百次的现场调研、方案论证，创建“在真实服役工况环境下实时研究真实工程材料的真实

失效过程”4R 试验方法论，引领试验评价研究范式从简单环境小样品实验向多场耦合工况环境大尺寸材料/全尺寸构件试验的变革，创新突破了以 162 项专利为代表的“尺度—环境—时间”多尺度多维度工程材料服役安全评价系列关键技术，构建起六大类自主可控的工程材料服役安全评价关键技术体系，大幅提升了我国工程材料服役安全评价能力和水平。建成世界一流、公共性、通用性、开放共享的大型科学试验装置，其中包括多相流、高温高压、自然大气、特殊地域、力学化学多场耦合、极端多因素等 6 套大型实体试验装置群，仿真和开放共享 2 套支撑系统，装置群于 2021 年 12 月通过 CNAS (China national accreditation service for conformity assessment) 体系认证。目前已有 4 套物理装置经国际评估，建设水平和综合试验能力优于国内外同类装置。该设施各试验装置构成示意图如图 2。

多相流环境结构材料试验装置

聚焦我国工业管道寿命预测和可靠性评价的核心难题，建成具有国际领先水平的 4 英寸工业级多相流管道腐蚀试验环路，能够精准模拟油、气、水、固等多相介质共存的工业管道服役工况，实现

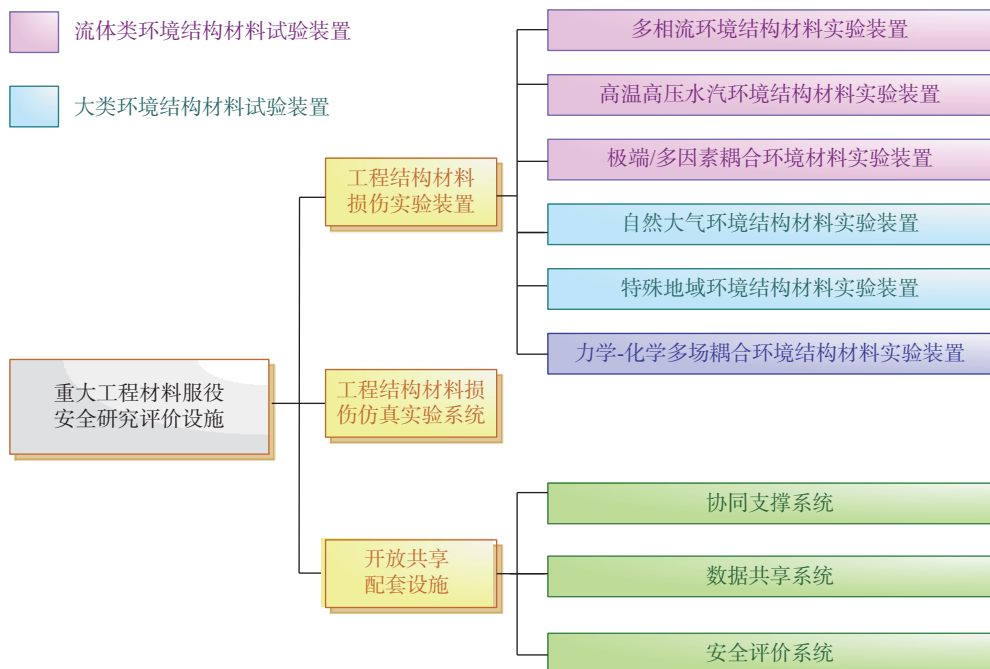


图2 重大工程材料服役安全研究评价设施各试验装置构成示意图

流型流态可视化和腐蚀失效过程的全信息监测与研究，图3是该装置群实景图。目前，该装置已承担长庆油田、国家战略储气库、延长油田等单位委托的科研实验任务。



图3 多相流环境结构材料试验装置实景图

高温高压水汽环境结构材料试验装置

聚焦我国核电、火电等能源装备关键核心构件的服役寿命和可靠性评价难题，建成的高温高压水汽环境结构材料试验装置在国际上首次实现高温高压双回路与管道加载耦合工况，首次实现火电站超超临界环境与管道加载耦合工况，超大试验空间包含国际最大的280 L高压釜和流速最高循环回路，实现对全尺寸、多形状构件的复杂模式加载，3套核心装置能够分别覆盖目前所有的第二代和第三代压水堆核电站参数及现有和正在建设的所有超超临界火电站设计参数要求，综合试验能力优于国内外同类装置，图4是该装置群中亚临界高流速管道腐蚀加载试验装置实景图。该装置已承担



图4 亚临界高流速管道腐蚀加载试验装置实景图

国产核电站关键管道、火电站新一代耐热钢、国产燃气轮机涡轮叶片关键材料等测试评价与科研任务。

自然大气环境结构材料试验装置

针对我国特殊大气环境及其效应特性，围绕工业和城市基础设施领域中工程材料与构件在自然环境中存在的腐蚀、老化失效问题，建成涵盖温度、湿度、淋雨、盐雾、全光谱辐照、紫外、污染气氛、浪涌等多环境因素耦合大型步入式环境模拟试验装置，结合一系列中小型配套设备、监检测系统及先进仿真评价能力，形成了具有多环境耦合的大型试验研究评价平台，综合试验能力优于国内外同类装置，图5是其中的大型步入式环境模拟试验装置实景图。装置已承担北京冬奥会主会场活动关键保障系统、核电站乏燃料贮存关键材料与结构等多项国家重大试验与研究任务。



图5 自然大气环境结构材料试验装置

特殊地域环境结构材料试验装置

针对路面工程，模拟高速公路、桥梁、机场道路等交通设施在不同环境因素和车辆载荷耦合作用下的长期服役行为，为路面结构的性能检测、损伤机理、寿命预测等基础性和应用基础性研究提供工作平台，已建成封闭式直线试验系统和开放式环道系统，在世界上首次实现覆盖全域，高低温、强降雨、强紫外、高地下水位等极端环境与各种重载车辆荷载的耦合控制，综合试验能力优于国内外同类装置，图6是其中封闭式直线加速加载试验装置实景图 and 环道加载装置实景图。

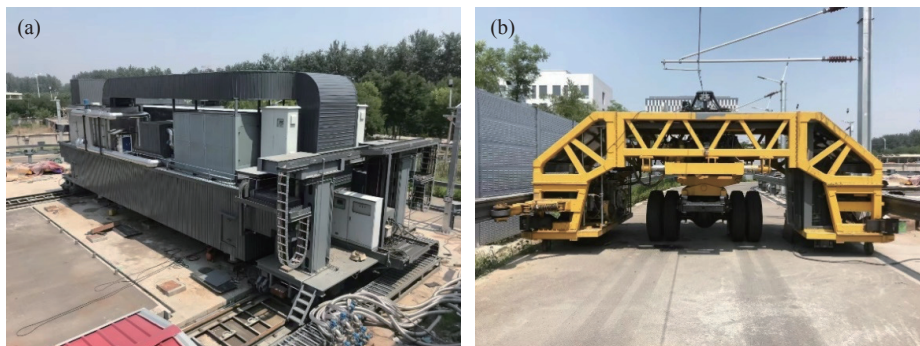


图6 封闭式直线加速加载试验装置实景图 (a) 和环道加载装置实景图 (b)

力学-化学多场耦合环境结构材料试验装置

建成国内最大的 2000 t 疲劳、3000 t 静载的集中加载试验系统，26 通道多点协调加载试验系统、6 自由度复合加载系统、超长时蠕变试验机群、环境模拟复合加载系统及远程混合试验系统等大型装置，可开展多场耦合环境下大尺寸、全尺寸构件等效加速试验，大大提升我国大型关键核心构件与结

构服役评价的实验测试能力，图 7 是该装置主要设备实景图。建设水平优于国内外同类装置。已承担国产重型燃气轮机主轴、国产下一代 16 MW 风电、天眼馈源支撑钢缆、北京冬奥会国家速滑馆顶部索网系统、北京城市排水主管道、极地采油装备关键部件、国产高铁主承重结构等重大装备关键部件的试验与研究任务。



图7 力学-化学多场耦合环境结构材料试验装置实景图: (a) 可实现 2000 t 疲劳载荷、3000 t 静载荷卧式拉压试验机; (b) 超长时金属高温蠕变试验机群; (c) 试验装置全景图

极端/多因素耦合环境材料损伤试验装置

建成国内首套实现原位观测的核电站极端/多因素环境试验系统，实现温度、压力、水化学参数精确模拟及动、静态载荷控制，通过耦合光学、光谱、电化学、声发射等原位分析技术实现对极端复杂环境下材料失效机理的精细化研究。与高温高压试验装置功能互补，形成系统化、全覆盖、规模化的高温高压水环境材料损伤研究与评价体系，图8是该试验装置部分设备实景图。



图8 极端/多因素耦合环境材料损伤试验装置部分设备实景图

工程结构材料损伤仿真试验系统

建成超越极端环境和时间/空间尺度限制的集成化、协同化数字仿真试验平台，开展面向材料失效全过程的多尺度仿真试验，与物理试验装置相结合，大大拓展装置的整体能力，图9是该系统视景室。系统已承担长贮装备性能评估、结构复合材料



图9 工程结构材料损伤仿真试验系统视景室

热-力-氧化多场耦合环境失效等仿真分析研究任务。

开放共享配套设施

运用实验网、知识图谱、人工智能等先进的信息化手段，建成集成化的开放共享配套设施，实现装置试验服务、仿真试验研究、科学数据和安全评价方法的开放共享，图10为该设施实景图。设施已承担我国深海极端环境钛合金、大型压水堆核电站关键材料、重型燃机高温合金、大型风电叶片等重大工程数据建模与安全评价研究任务。



图10 开放共享配套设施实景图

结束语

针对我国重大工程和设施服役过程中的尺度域、环境域、时间域和安全评价等科学问题开展试验研究，是为我国重大装备开发制造和工程设施安全服役的必然技术支撑。通过汇聚形成一支由国内外院士、国家特聘教授领衔的高水平科研试验团队，积极开展国内外合作，建立统一规范标准，为建设我国自主可控的中国式现代化保驾护航。未来，国家科学中心及材料服役安全大科学设施将坚持“四个面向”，聚焦我国重大需求，紧盯终端应用场景，加强产教融合，以服务我国工业核心技术研发与产业化，打造世界一流的科学研究机构。

参考文献

- [1] 王勇. 强化可靠性公共服务 有力保障制造业可靠性水平提升——《制造业可靠性提升实施意见》解读. *中国工业和信息化*, 2023(7): 1
- [2] 张瑞卿. 建筑支架倒塌事故的原因和防控措施. *上海建设科技*, 2022(2): 40
- [3] 刘勇, 李风雷, 刘建秋. 变电站户外钢构支架的腐蚀和防护研究

- 究. 工业建筑, 2012, 42(S1): 249
- [4] 陈嘉豪, 裴爱国, 马兆荣, 等. 海上漂浮式风机关键技术研究进展. 南方能源建设, 2020, 7(1): 8
- [5] 周海麟. 通用低压电器分会: 开展低压电器可靠性提升工程引领行业 提升产品可靠性水平. 电器工业, 2014(5): 33
- [6] 黄全全, 王立, 葛伟华. 影响铝线键合失效因素及失效分析. 电子技术与软件工程, 2020(21): 99
- [7] 万勇, 董金鑫, 冯瑞华, 等. 全球新材料领域基础研究发展态势及对我国的启示. 世界科技发展与研究, 2023, 45(4): 509

作者简介: 梁治国 (1977—), 男, 山西省太原市人, 北京科技大学国家材料服役安全科学中心副主任。2005年毕业于北京科技大学机械电子专业, 获工学博士学位。主要研究方向: 大科学装置建设与运行管理, 产教融合与产学研合作机制研究, 故障诊断与信号分析, 图像识别与工业检测。通信地址: 北京市昌平区昆仑路 12 号北京科技大学昌平创新园区, 邮编: 102299; E-mail: zgliang@ustb.edu.cn。