

项目名称:压水堆核电高温高压水环境材料损伤关键测试技术及成套装备与应用

## 一、提名意见

该项目针对压水堆核电站核岛中常见的影响核电站安全和寿命的腐蚀问题,经过 10 余年的研究和积累,自主研制了 10 类模拟核电真实水化学环境和失效模式的成套试验装备与测试技术,实现了高温水中材料表面状态、腐蚀电化学、应变、裂纹扩展等动态信号的原位测量,特别是首次实现了高温高压水加载条件下原位光学、光谱、声发射、电化学等集成技术对材料腐蚀损伤过程的准确测量;发明了高温水中不同形式载荷的控制方法和不同几何尺寸样品的测试技术,实现了高温水中腐蚀疲劳、应力腐蚀、腐蚀磨损、缝隙腐蚀等测试,特别是首次实现了高温高压水中通过原位划伤再钝化快速评价应力腐蚀敏感性。研制设备在国内均属于首台套,填补了我国在该领域的空白,其中 4 台国际先进、2 台国际首创。形成了自主知识产权(申请发明专利 35 件,已授权 26 件;注册软件著作权 1 件),结束了国外的技术封锁和市场垄断,使我国核电材料性能测试与评价设备技术跨入了世界先进行列;编制了 12 项测试标准(4 项团体、8 项企业),指导、规范和提升了行业水平;学术成果得到国际同行的高度评价,被认为“在这个领域位于领先行列(IMR is a top player in this area)”,提高了我国在国际核电领域的影响力,争得了应有的国际话语权,培养了大批核电材料领域的研发人才;研制设备直接应用于我国多个第三代核电型号关键装备的设计、生产以及军工装备的制造评价中,解决了关键瓶颈问题,为核电作为国家名片“走出去”提供了重要的科技支撑。

提名该项目为国家技术发明奖 二 等奖。

## 二、项目简介

针对核电厂核岛关键设备的主要腐蚀失效模式（均匀腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳、腐蚀磨损、缝隙腐蚀、辐照促进应力腐蚀等）以及实验室模拟试验的关键难点问题，自主设计并研制了 10 类模拟核电高温高压水环境开展材料损伤试验研究的关键测试装备和技术。关键技术要点：严格模拟核电站高温高压水化学环境，国际首次实现在核电高温高压水中材料在加载条件下的光学、光谱、声发射、电化学、裂纹扩展、应变等在线原位测量；首次实现核电高温高压水中划伤再钝化暂态电化学评价材料应力腐蚀敏感性；实现核电高温高压水中腐蚀电化学、应力腐蚀、腐蚀疲劳、腐蚀磨损、缝隙腐蚀、辐照促进应力腐蚀等多种材料腐蚀失效行为的原位测试。研制设备在国内均属于首台套，填补了我国在该领域的空白，其中 4 台国际先进、2 台国际首创。形成了自主知识产权（申请发明专利 35 件，已授权 26 件；已授权实用新型 14 件；注册软件著作权 1 件），结束了国外的技术封锁和市场垄断，使我国核电材料性能测试与评价设备技术跨入了世界先进行列；建立了我国核电材料试验与安全评价平台，服务于核电行业领域，成果已在核电研究院所、核电设计院、核电装备制造企业、核电站运行与服务企业、核安全审评机构等 14 家单位得到应用，对设计选材、设计曲线、评价模型、制造工艺优化、核电站安全运行和事件处理策略、安全审评提供了有力的技术支持；项目成果直接应用于我国 CAP 系列、华龙一号等多个重要第三代核电型号关键装备的设计、生产过程以及重要装备的制造评价中，同时用于在役核电站的事故分析与运行安全评价中，保障了我国重大工程和国防建设的需要；已产生了 5 亿元的直接经济效益；编制了 12 项测试标准（4 项团体、8 项企业），指导、规范和提升了行业水平；发表了系列重要研究成果（期刊论文 153 篇，含国际论文 98 篇；国际大会特邀报告 35 篇、国内大会特邀报告 10 余篇），学术成果得到国际同行的高度评价，被认为“在这个领域位于领先行列（IMR is a top player in this area）”，提高了我国在国际核电领域的影响力，争得了应有的国际话语权，培养了大批核电材料领域的研发人才，为核电作为国家名片“走出去”提供了重要的科技支撑。

### 三、客观评价

经中国核能行业协会组织鉴定（中核集团李冠兴院士任组长）认为，“该成果填补了我国空白，总体达到国际先进水平，其中 2 项装备属于国际首创、4 项装备国际领先,使我国核电材料性能测试与评价技术跨入世界先进行列。”

利用该项目独有的设备，在国际上首次获取了新的现象与规律，包括高温高压水中的电动力学规律、划伤再钝化规律、氧化膜特征与耐腐蚀的关系等等，由此获得了国际同行的高度认可。例如该项目结果发表论文后得到国际业内特别是核电材料腐蚀的世界级专家们的大量引用和肯定，包括美国密歇根大学（全美核工系排名第一）著名核电材料专家 Gary S. Was 教授（ICG-EAC 前主席）、法国阿海法公司研发中心腐蚀研究部主任 Marc Foucault 教授、法国著名核电材料专家 Philippe Marcus 教授（欧洲腐蚀联盟前主席）、日本著名核电材料专家东北大学 T. Shoji 教授（IFRAM 前主席）、著名材料腐蚀专家加拿大多伦多大学 Newman 教授、加拿大原子能研究院著名专家 Yu-Cheng Lu 博士、美国太平洋西北国家实验室著名核电材料专家 S. M. Bruemmer 博士、比利时著名核电领域专家 Marc Vankeerberghen 博士、韩国核能研究院 Hur 博士等。举例如下：

- 美国密歇根大学著名核电材料专家 Gary S. Was 教授在 *Journal of Nuclear Materials* 论文中引用了韩恩厚等关于高温高压水不锈钢表面氧化膜/钝化膜生长特征的工作“在长寿命的氧化性物质中， $H_2O_2$ <sup>14,15</sup> 和溶解氧<sup>16,17</sup> 增加不锈钢的腐蚀电位，并影响氧化膜在 LWR 环境中的形貌和成分”……

In water, radiation is known to create several strong oxidizing species due to water radiolysis. Among the long-lived species,  $H_2O_2$  [14,15] and dissolved  $O_2$  [16,17] have been shown to increase the corrosion potential of stainless steel and affect the composition and morphology of the oxide in LWR conditions [18]. In addition to these long-lived species, several short lived radicals such as  $OH\cdot$  and  $H\cdot$  are created in the water [19] and may affect the rate of corrosion.

- 法国著名的核电材料腐蚀专家 Marc Foucault 教授在 *Scripta Materialia* 论文中对王俭秋和韩恩厚等关于冷加工量对 600 合金晶界特征和晶界应变集中的影响研究工作进行了多处引用“最近，利用透射电子显微镜发现 600 合金的应力腐蚀开裂与氧化前利用 EBSD 测量的晶界应变集中有关<sup>17</sup>”；“ $\Sigma 3$  型重合位置点阵晶界，例如晶界 1 和晶界 3，具有良好的耐应力腐蚀开裂性能，而未定义的大角度随机晶界耐应力腐蚀开裂性能则较差”。（文献 17 为王俭秋、韩恩厚等的论文）

neutron diffraction method has also shown the intergranular strains [16]. More recently, the stress corrosion cracking of alloy 600 observed by transmission electron microscopy was correlated with the strain concentration at grain boundaries before the oxidation, as imaged by electron backscattering diffraction (EBSD) [17]. Unfortunately, given the changes in surface roughness, EBSD is not suitable to monitor changes in the strain field for large-scale kinetics.

此外，项目成员近年来在本领域几个国际组织中任职（包括 ICG-EAC 核电环境促进开裂国际合作组织理事会 40 余年来唯一中国人、IFRAM 核电设备老化前瞻管理国际组织（IFRAM）国际执委会成员唯一华人，等等），2016 年获国际腐蚀工程师协会 Whitney 奖（腐蚀领域最高奖，70 年来唯一华人），获奖报告为采用这些设备完成的针对核电材料的腐蚀机理“Understanding the Corrosion Mechanism of Materials in Nuclear Power Plants”，说明取得了国际话语权并产生了**重要国际影响**。

2015 年 1 月，中国科学院组织、并聘请 10 余位国际著名专家（含美国、英国、德国、法国院士）对金属研究所进行独立的国际评估，其中有 2 位专门的核电专家。核电材料方向被国际专家评价为**处于国际领先行列**（评语如下）。此外，中国科学院对全院 104 个研究所的“十二五”所有重点方向进行评估，该项目研究属于金属研究所“十二五”“十三五”发展目标中 5 个重点培育方向之一“核电材料与安全评价方向”。该方向在“十二五”国际评估中被国外专家评估为“优”，并在中科院的重点培育方向评估中也被评价为“优”。该项目方向在“十三五”被提升为三个重大突破之一。

#### 国际评估的评语：

*Nuclear materials:* Research on nuclear materials ageing covers a wide range going from understanding the mechanisms of corrosion (especially stress corrosion cracking which is a very strong topic at IMR) using new methods developed at IMR (such as *in situ* high temperature and high pressure water optical Raman spectroscopy, electrochemical measurements, and acoustic emission) in order to look at different key factors (e.g. the effects of surface scratch, the role of dissolved oxygen, alloy elements and the effects of stress) to service life prediction and safety assessment. As an example, the nature of the oxide layers and the modified alloy at the oxide-alloy interface is a major issue worldwide and IMR is a top player in this area.

The panel recommends that IMR should maintain its excellent nuclear materials research, which is very important for development of the Chinese nuclear industry.

**核用材料：**金属所的核用材料性能退化研究涉及很广，从腐蚀机制的研究（尤其金属所的应力腐蚀是非常强）到寿命预测和安全评估，利用金属所自己研发的新方法（例如高温高压水原位光学、原位激光拉曼、原位电化学测量和原位声发射等）来研究不同的关键因素（例如：表面划伤、溶解氧、合金元素和应力的影响）。其中的一个例子，氧化膜的本质和氧化膜与合金界面是世界范围内的重要课题，金属所在这个领域位于领先行列。

评估委员会建议金属所应该保持该卓越的核用材料研究，这对中国核工业发展非常重要。

#### 四、推广应用情况

本项目的设备已经生产 20 余台套，包括在申请单位应用的 18 台套；已销售到中广核苏州热工研究院有限公司、国核电站运行服务技术有限公司共 3 台套，应用证明显示“回路系统价格低、性能稳定可靠、运行状态良好”；“金属所突破了国外技术垄断，填补了国内空白”，使得我国研究院所的试验水平得到提升，保障了我国压水堆核电重大专项等国家重要科研项目的顺利实施。

本项目成果已在核电设计院、研究院所、装备制造企业、运行与服务企业、安全审评机构等 14 家单位得到应用（应用证明）。

应用单位名称	应用技术	应用的起止时间	应用情况
上海核工程研究设计院	核电高温高压水腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳试验设备与成果	2011 年 12 月—2016 年 6 月	用于我国三代核电设计选材、设计参数和设计曲线，以及制造厂审定
中国原子能科学研究院	核电高温高压水中腐蚀设备与成果	2011 年 12 月—2014 年 12 月	用于三代核电水化学参数优化
中国核动力研究院	核电腐蚀电化学设备与成果	2013 年 12 月—2014 年 12 月	用于我国关键设备锆合金选择与评定
中广核苏州热工研究院	模拟核电高温高压水循环回路系统	2012 年 6 月—2017 年 3 月	用于测试设备平台的建造
上海电气核电设备有限公司	腐蚀与应力腐蚀设备与成果	2013 年 6 月—2016 年 6 月	用于我国制造技术的工艺评定与优化
哈电集团（秦皇岛）重型装备有限公司	腐蚀试验设备与成果	2014 年 10 月—2015 年 12 月	用于制造技术的工艺评定与优化
中国第一重型机械股份公司	核电高温高压水点腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀性能试验设备与成果	2015 年 6 月—2016 年 8 月	用于关键设备制造技术工艺评定与优化
宝钢特钢有限公司	核电高温高压水腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳、缝隙腐蚀试验设备与成果	2012 年 6 月—2014 年 12 月	用于我国蒸汽发生器 690 U 型管的国产化生产中
烟台台海玛努尔核电设备有限公司	核电高温高压水腐蚀性能与成果	2012 年 1 月—2016 年 6 月	用于三代核电锻造主管道工艺评定
大亚湾核电运营公司	核电高温高压水腐蚀与应力腐蚀试验设备与成果	2012 年 10 月—2016 年 6 月	首次实现现役核电站内核岛内关键结构服役安全评定
武汉核动力运行研究所	核电缝隙腐蚀、应力腐蚀试验设备、在线监测电极（探头）系统与成果	2010 年 1 月—2016 年 6 月	用于关键装备的缝隙腐蚀、应力腐蚀评定、在线原位监测
国核电站运行服务技术有限公司	核电高温高压水应力腐蚀试验测试软件	2015 年 12 月—2016 年 6 月	用于我国三代核电的应力腐蚀测试平台建设
环保部核与辐射安全防护中心	核电高温高压水腐蚀疲劳试验设备与成果	2013 年 5 月—2016 年 6 月	用于核电装备的安全审评中

## 五、主要知识产权证明目录（不超过 10 件）

知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人	发明专利有效状态
发明专利	一种高温高压原位多道快速划伤电极系统	中国	ZL201210436247.9	2014.07.02	1434179	中国科学院金属研究所	韩恩厚； 郦晓慧； 王俭秋	有效专利
发明专利	一种实现高温高压环境下加载的装置及其应用	中国	ZL200810228711.9	2010.12.08	710779	中国科学院金属研究所	匡文军； 吴欣强； 韩恩厚	有效专利
发明专利	一种缝隙腐蚀模拟试验研究的人工缝隙装置及使用方法	中国	ZL201310474104.1	2015.07.15	1724103	中国科学院金属研究所	陈东旭； 吴欣强； 韩恩厚	有效专利
发明专利	一种精确控制水中溶解氧含量的系统及其应用	中国	ZL200810012594.2	2010.06.09	636573	中国科学院金属研究所	匡文军； 吴欣强； 韩恩厚	有效专利
发明专利	一种具有自动控制功能的高温高压水循环腐蚀实验系统	中国	ZL201010275276.2	2013.09.25	1276456	中国科学院金属研究所	郦晓慧； 王俭秋； 韩恩厚； 柯伟	有效专利
发明专利	一种带声发射测试的高温高压循环水恒载拉伸实验装置	中国	ZL201110184583.4	2013.06.19	1222884	中国科学院金属研究所	徐健； 吴欣强； 韩恩厚； 王翔	有效专利
发明专利	一种高温高压原位划伤及腐蚀磨损试验装置	中国	ZL201110207373.2	2013.03.27	1162235	中国科学院金属研究所	郦晓慧； 王俭秋； 韩恩厚； 柯伟	有效专利
发明专利	高温高压水中疲劳试样标距段应变的原位实时监测系统	中国	ZL201310554160.6	2016.01.13	1916272	中国科学院金属研究所	谭季波； 吴欣强； 韩恩厚； 王翔	有效专利
发明专利	实现高温高压水溶液体系电化学测试的工作电极及其制备	中国	ZL200810011046.8	2012.07.04	995253	中国科学院金属研究所	孙华； 吴欣强； 韩恩厚	有效专利
发明专利	一种高温高压水溶液 pH 值的测量方法	中国	ZL200810013139.4	2012.12.05	1094445	中国科学院金属研究所	孙华； 吴欣强； 韩恩厚	有效专利

## 六、主要完成人情况表

姓 名	韩恩厚	排 名	1
行政职务	中科院沈阳分院院长、中科院核用材料与安全评价重点实验室主任	技术职称	研究员
工作单位	中国科学院金属研究所		
完成单位	中国科学院金属研究所		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>项目总负责人。提出原位测试方法的总体设计和思路，对 1--4 发明点有重要贡献。与同事合作并带领学生研制了系列试验模拟设备，实现了高温高压水中均匀腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳、腐蚀磨损、缝隙腐蚀、辐照促进应力腐蚀等的模拟测试；研制了原位测量技术，包括原位光学、光谱、电化学、声发射、应变、裂纹扩展等测试，以及在线电化学监测电极及监测技术等。已授权发明专利 26 件；发表相关学术论文 147 篇，相关大会特邀报告和邀请报告 60 余次。</p>			

## 六、主要完成人情况表

姓名	吴欣强	排名	2
行政职务	辽宁省核电材料安全与评价技术重点实验室副主任	技术职称	研究员
工作单位	中国科学院金属研究所		
完成单位	中国科学院金属研究所		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>对发明点 1、3、4 有重要贡献。研制了系列高温高压水模拟试验设备及原位测量技术，覆盖室温-700℃温度范围，常压-35 MPa 压力范围，0-30 L/h 流速范围，能精确调控水化学，保证长期运行的安全性和稳定性，并具备原位电化学、声发射、光学、光谱和力学性能测试功能。包括：高温高压循环水（360℃/20 MPa）模拟及原位观测装置、高温高压水（400℃/25 MPa）环境疲劳测试装置及原位应变测量技术、高温高压水（350℃/20 MPa）恒载拉伸及原位声发射测量装置；高温高压水（600℃/35 MPa）在线电化学监测电极及监测技术；高温水溶液的 pH 值在线测量技术；高温高压水缝隙腐蚀模拟实验技术等。已授权发明专利 16 项，其中 9 项专利技术已在国内核电企业应用；发表相关学术论文 58 篇，SCI 收录 46 篇。</p>			

## 六、主要完成人情况表

姓名	王俭秋	排名	3
行政职务	中科院核用材料与安全评价重点实验室副主任	技术职称	研究员
工作单位	中国科学院金属研究所		
完成单位	中国科学院金属研究所		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>对发明点 1、2、4 有重要贡献。研制了模拟核电高温高压水循环回路、高温高压水腐蚀电化学、原位划伤再钝化、腐蚀磨损设备、直流电位降法测试应力腐蚀裂纹扩展的系列高温高压水模拟试验设备及原位测量技术，最高温度 400℃、最高压力 25 MPa、最快划伤速度 4m/s、往复位移为 0~5 cm，往复频率为 0~0.25 Hz。能精确调控水化学，保证长期运行的安全性和稳定性。已授权发明专利 9 项；发表相关学术论文 81 篇，SCI 收录 66 篇。</p>			

## 六、主要完成人情况表

姓名	郦晓慧	排名	4
行政职务	无	技术职称	中级（副主任工程师）
工作单位	华电电力科学研究院有限公司		
完成单位	中国科学院金属研究所		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>对发明点 1、2 有重要贡献。研制了模拟核电高温高压水循环回路、高温高压水腐蚀电化学、原位划伤再钝化、腐蚀磨损设备系列高温高压水模拟试验设备及原位测量技术，最高温度 400℃，压力 25 MPa，最快划伤速度 4m/s，往复位移为 0~5 cm，往复频率为 0~0.25 Hz。能精确调控水化学，保证长期运行的安全性和稳定性。已授权发明专利 6 项，发表相关研究论文 6 篇，5 篇 SCI 收录。</p>			

## 六、主要完成人情况表

姓名	匡文军	排名	5
行政职务	无	技术职称	博士后
工作单位	美国密歇根大学		
完成单位	中国科学院金属研究所		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>对发明点 1 有重要贡献。研发了国内首套模拟核电高温高压水循环回路，实现了 350℃、20 MPa 以下核电运行水环境条件（水化学、温度和压力）的准确模拟，并在其上开发了原位光学、光谱观测窗口和恒载荷加载装置，实现了加载条件下的原位光学观测和拉曼光谱检测，提供了材料高温高压水腐蚀损伤过程的直接实验证据。授权国家发明专利 5 项，其中 4 项已在国内核电企业应用；发表相关 SCI 论文 8 篇。</p>			

## 六、主要完成人情况表

姓名	彭群家	排名	6
行政职务	无	技术职称	研究员
工作单位	苏州热工研究院有限公司		
完成单位	中国科学院金属研究所		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>对发明点 1、3 有重要贡献。研制了模拟辐照促进应力腐蚀开裂的试验设备，可对离子辐照材料高温高压水环境的应力腐蚀开裂敏感性进行快速评定；研制了应力腐蚀测试方法和应力腐蚀裂纹扩展（DCPD）原位测试软件，高温高压水环境应力腐蚀裂纹长度原位测量精度<math>\leq 3</math> 微米。申请发明专利 8 项，已授权发明专利 1 项；软件著作权登记 1 项；发表相关学术论文 19 篇，SCI 收录 16 篇。</p>			

## 七、完成人合作关系说明

该项目的6名完成人均来自中国科学院金属研究所。6名完成人来自同一研究团队。团队负责人韩恩厚研究员是支撑该奖励的五个项目的负责人，参加了所有课题内容，所有专利、论文均有他的署名。团队人员的分工各有侧重，相关专利和论文等按照具体工作贡献署名。例如，吴欣强研究员负责腐蚀疲劳试验技术，长期合作者，联合开发技术和发表论文；王俭秋研究员负责电化学与应力腐蚀损伤行为研究，是韩恩厚研究员引进“百人计划”人员；酆晓慧、匡文军两位博士是韩恩厚、吴欣强、王俭秋研究员的研究生，他们的研究生论文都从事本项目相关研究，毕业后，酆晓慧目前到杭州工作，匡文军在美国做博士后。彭群家研究员负责辐照促进应力腐蚀损伤行为研究，是韩恩厚研究员引进的“百人计划”人员，2017年7月从团队调离到苏州热工研究院有限公司。因此，6人有长期的合作关系。