



核材料是国防建设不可或缺的关键材料。随着我国能源发展方式的转变，应用潜力很大，是国民经济发展重要的支撑材料。腐蚀是影响核电站安全运行的首要问题，高温高压水中的腐蚀动力学与常温或较低温度下不同。材料成分、材料和部件的制备加工工艺会影响表面状态、材料内部微观结构，从而显著影响核电材料的腐蚀速度和核电站的安全性。发展新材料的同时，进一步加强长寿命核电结构的安全性、可靠性、寿命评价，对保障核电站安全运行乃至核能有效利用起到关键作用。

综合评价 整体规划 加速原始创新



核材料主题由毛新平院士（左一）和张联盟教授（右一）共同主持。中国科学院金属研究所韩恩厚研究员（右二）作了题为“核电关键材料的评定技术与部件的安全评价”的报告、中国工程物理研究院汪小琳研究员（左二）作了题为“金属铀表面腐蚀研究进展”的报告。

中国科学院金属研究所韩恩厚研究员对核电关键材料的评定技术与部件的安全评价做了详细报告。首先介绍了研发的10余种模拟核电站高温高压水中进行实验室加速腐蚀试验设备，包括原位测量技术新方法，对核电站中主要失效形式实现了全覆盖；通过采用这些新装备与技术，比较研究了核电站常用材料的腐蚀行为以及材料微观特征的影响；解释了不同制造工艺影响核电高温高压水中材料腐蚀寿命的原因；比较了运行水化学参数对腐蚀与放射性排出的差异，提出了溶解氧、溶解氢控制的重要性与注锌控制的方法；最后从我国某实际核电结构部件的失效根本原因分析出发，建立了安全分析与服役寿命评估方法，首次自主实现了百万千瓦堆核岛内关键部件的安全分析与寿命评价，并成功用于核电站的处置决策中。

中国工程物理研究院汪小琳研究员针对核能及国防领域的金属铀表面腐蚀研究进展进行细致分析。报告中对当前金属铀表面腐蚀科

学领域的热点和难点进行解读，介绍中物院过去一段时期内在金属铀表面腐蚀（重点是表面氧化与表面氢化腐蚀）科学研究的研究进展，并对未来的发展趋势和方向进行展望和讨论。铀材料的表面腐蚀问题事关使用性能、服役寿命以及库存可靠性，是必须深入认识并进行防护的，也是一个前沿基础科学问题，与钢系元素独特的5f电子行为密不可分，其背后蕴含着大量的科学未知，是钢系材料研究探索的一块沃土。



院士点睛

周廉院士：本届论坛缺一个能综合评价现有核材料研究现状和给出未来发展趋势方向的报告，这也说明我们急需领军人物。我发现，如果在国内建电站，基本上所有核用的材料都能解决，但是一出口就遇到问题。什么问题？很多原始创新不是中国搞的，所以有很大的问题。这个问题怎么解决？我们应该发展下一代材料，无论是钢、高温合金或者是锆或者是钛，所有能用的各种材料。这个有必要制定一个核工业材料20年、30年发展计划，才可能实现把中国的核材料、核电建设达到世界的顶尖水平。

热烈讨论

● 一般认为金属的应力腐蚀是特定的金属和特定的应力腐蚀介质相互之间的作用。那么您认为应力腐蚀真正的腐蚀介质是什么，是不是有氢的参与？

韩恩厚研究员：对，教科书上是这么说的，应力腐蚀需要特定的材料、特定的介质和拉应力。这个概念可以说是发生快速应力腐蚀的一个基础。但是在核电站条件下，它要求长寿命。在这种条件之下，它还会发生应力腐蚀，因为它使用的时间特别长、应力腐蚀开裂的速度非常慢。因此，个人认为这个定义应当改写。应该说，在这种长寿命结构的应力腐蚀中，氢的参与确实起一定作用，但也不是必须的，要具体问题具体分析。

● 您刚才说材料中位错环的富集可能会影响材料开裂的行为，究竟是什么样的影响？

韩恩厚研究员：形成位错环后，位错环的周边就有不同元素的原子富集，刚才上面那个图表明了磷元素在那里富集，比其他区域要翻了一倍。我们还有一个材料比如富铜原子团簇富集，甚至硅会富集。这种原子会跟着位错环跑，跑到那个地方富集以后，那个地方局部的材料成分抵抗应力腐蚀的能力就会显著降低。

● 我看到您研究了十余种模拟核电站高温高压水腐蚀实验、加速腐蚀的实验设备，我想问一下这十余种里面有没有适合我们铝合金评价的？

韩恩厚研究员：对于铝合金来讲，实际上它应该说跟其他材料抵抗各类腐蚀的评价方法也都类似，我们一方面要模拟实际的腐蚀失效形式，另一方面一定要在实验室进行加速实验。但是加速试验第一要在动力学等同条件之下进行，应该说是按照我提出的损伤等效三原则开展，即：腐蚀形貌相似、腐蚀产物相同、损伤动力学一致。要想做到等效加速，我们可以把温度提高，提高多少度，加速了多少倍，这个是可控的；第二是把材料的变形状态适当提高，这样就可以进行适当的加速；另外是适当改变腐蚀介质的离子状态。总之，对于你这个铝合金的加速试验问题，目前的实验方法上完全可以实现，我前面只是没有提及应力腐蚀。

● 毛新平：第一个问题，随着使用温度不断的提高，影响腐蚀这些因素变化的规律是什么？劣化程度是什么，你研究到什么程度？第二个问题，随着核电站建设发展趋势，你目前已经研发出的10余种模拟与相关检测技术、检测方法有没有做相关的准备来迎接新一轮核电站建设的挑战？

韩恩厚研究员：感谢您的问题。目前我们已经研发出了10余种模拟不同腐蚀损伤形式的技术，并配有多种参数的原位检测手段，包括原位光学、原位光谱、原位电化学、原位载荷、原位声发射、原位裂纹扩展、原位裂纹萌生等等。此外，我们实验室也已经研发出了适合于核反应堆中长期使用的原位检测探头，已经得到大台架上2年的考核，可以说，技术上已经具备条件。当然，原位检测方法还可以随着技术进步进一步拓展。目前我的实验室动态的回路可以达到600度，静态釜做到700度，可以满足目前的各类水堆的需求。再往上的温度我目前的已有设备做不上去，以后能不能再往高温做，有需求时我们再进一步努力。实际上，在实验室模拟核电站服役条件上，不仅要考虑温度，还要模拟各类条件，一方面把温度提上去，另一方面必须考虑腐蚀介质条件、压力也必须得上去，这样才能符合条件，否则，做出来的数据与实际的损伤机理不同。我们做了超超临界反应条件下的实验，一旦进入超临界那一段之下，它发生腐蚀的机制实际上跟较低温度条件下不一样。因此，要评价材料、预测和评估服役安全性与寿命，需要把动力学做出来，才能满足未来核电站安全服役的需求。

