

冷却剂丧失事故工况下压水堆燃料组件堆外鼓胀爆破试验综述

崔超¹, 韩智杰^{2*}, 关玺彤²

(1. 中国原子能工业有限公司, 北京 100032;

2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要 冷却剂丧失事故 (LOCA) 在反应堆安全分析中占有重要的地位, 燃料组件需要保证在事故下堆芯的可冷却性, 进行 LOCA 工况下各类试验研究的重要性不言而喻。目前, 国内已进行了较为系统的 LOCA 工况下锆包壳单棒鼓胀爆破堆外试验研究, 但尚未进行完备的组件试验, 相关的组件试验方法还有待探索。综述通过调研国外经典的 LOCA 工况下组件堆外鼓胀爆破试验, 学习相关试验方法, 掌握试验技术, 旨在为后续将要进行的国内新型燃料组件堆外鼓胀爆破试验打下基础。

关键词 LOCA; 鼓胀爆破; 燃料组件; 流动阻塞

基金项目: 中核集团青年英才项目 (中核科发 [2022] 379 号) “失水事故条件下压水堆燃料组件可冷却性研究” 资助。

中图分类号: TL3

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)09-0013-03

1 研究背景

大破口失水事故现象复杂, 后果严重, 在反应堆安全分析中占有重要地位。LOCA 事故过程中, 燃料包壳内外压差发生剧烈变化, 同时由于传热恶化以及燃料中储存的能量和衰变功率的释放, 导致包壳温度迅速上升, 在一定温度下将会发生鼓胀爆破, 致使放射性气体释放^[1]。LOCA 事故条件下需要满足的要求包括: (1) 保持可冷却的几何形状; (2) 保持长期冷却能力^[2]。在典型的失水事故热工水力条件下, 反应堆燃料组件棒束的可冷却几何形状是失水事故研究的关键问题之一, 多个国家开展了相关试验研究。

事故分析程序中的 LOCA 分析模型来源于 NUREG-0630^[3] 法规中的鼓胀爆破模型。该模型通过爆破压力得到爆破温度, 进而得到爆破应变与流动阻塞率。报告中给出的 LOCA 鼓胀爆破模型来源于国外大量的试验数据, 这些原型数据大部分是堆外单棒鼓胀爆破试验给出的, 但后续研究也表明, 组件试验得到的结果与单棒试验结果会略有差异, 继续进行组件试验是有必要的。

本文通过调研国外 LOCA 工况下组件的鼓胀爆破试验方法, 总结了进行相关试验时的试验技术, 并明确

了试验中的一些特有的现象, 为国内开展相关研究提供参考。

2 国外相关试验研究

2.1 NUREG-0630 报告模型

NUREG-0630 报告中主要介绍了爆破温度与工程环向应力、爆破应变与爆破温度和流动阻塞与爆破温度的关系。本部分主要介绍与组件试验相关的流动阻塞。流动阻塞定义为棒束的横截面流动面积减少的百分比。由于阻塞数据的稀缺性, 该报告从单棒爆破应变中导出组件阻塞, 然后将结果与组件数据进行比较以进行验证。爆破应变和棒束阻塞之间的经验关系如图 1 所示。

平均共面棒应变与爆破应变的关系由组件的大小决定, 组件越大, 爆破位置位于同一水平面的可能性就越小。对于小组件 (如 4*4), 平均共面棒应变取爆破应变的 0.56 倍, 对于大组件, 平均共面棒应变取爆破应变的 0.46 倍。

2.2 REBEKA 多棒组件试验

REBEKA 多棒组件试验采用不同的试验棒束: R-1 至 R-4 和 REBEKA-M 为 5*5 排列的棒束, R-5 至 R-7 为 7*7 棒束。采用基于德国压水堆燃料棒设计的内部电加热

*本文通讯作者, E-mail: mr_hanzhijie@163.com.

全长模拟棒，并在与燃料组件相对应的位置上装有8个定位格架。将试验棒束包容在一个未加热的薄护罩内。

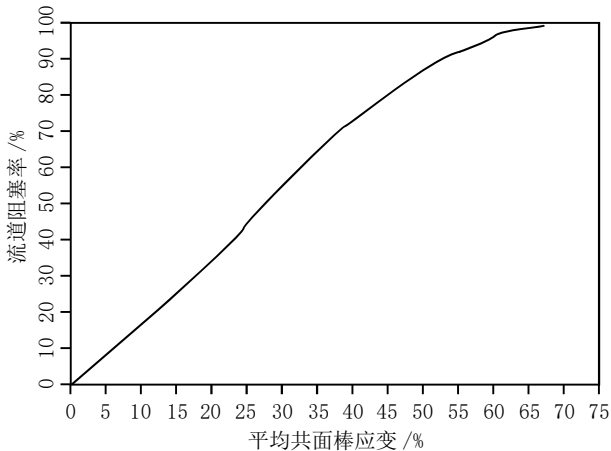


图1 流动阻塞与平均共面棒应变的关系

在这些试验中，设定了热工水力条件以模拟德国压水堆常见的典型再淹没条件（在冷热两端都进行注水）。因此，升温过程（大约7 K/s）是在向下流动的蒸汽（大约2 m/s）中进行的，直到达到预期的温度水平，然后根据所研究的情况在向上或向下注水的情况下进行再淹没。

REBEKA多棒组件试验的一个主要特点是选择代表德国KWU压水堆设计（冷热两端安注）的再灌水/再淹没的特定热工水力条件。这种条件有利于棒温度的轴向非均匀性，因此最大应变高度的轴向扩展限制了流动阻塞的程度。在这样的条件下，棒之间的机械相互作用是非常微弱的，并且棒束大小的影响（R-5的结果与R-3的结果相比）也是很微弱的，这不同于美国橡树岭国家实验室（ORNL）的MRBT实验。

尽管导向管的存在会在相邻的棒上产生周向温差，但并不会导致爆破应变和流动阻塞的降低，甚至爆破应变与流动阻塞会增加。导向管与相邻变形棒之间的机械相互作用中断了相邻棒的不对称应变（“热侧伸直效应”）并重新均匀化了周向温度场^[4]。

2.3 ORNL-MRBT多棒试验

1977年至1981年，ORNL对不同结构形式的组件进行了6次MRBT（Multi-Rod Burst Tests）试验：

1. 试验B1、B2、B3为4×4组件试验。
2. 试验B4为6×6组件试验（出现故障，未详细说明）。
3. 试验B5和B6为8×8组件试验。

所有这些试验都是在蒸汽流量很低的环境下进行

的。试验棒内部有电加热元件，与单棒试验中使用的电加热元件相同，具有相同的加热长度（0.915 m），经过加压，四根热电偶焊接在包壳内表面上。定位格架包括560 mm下部格架和345 mm上部格架。

MRBT试验的主要目的是研究在有利于大变形的传热条件下，组件大小以及热工和机械边界条件对爆破应变和流动阻塞的影响。主要结果表明，在一个大的组件中内部棒的应变导致相邻棒之间的机械相互作用，显著地改变爆破前变形的发展空间，即使这些相互作用对爆破温度和应变的影响有限。鼓胀棒在变形过程中被别的燃料棒所限制，将会导致棒的变形沿着轴向扩展，从而导致更大的体积膨胀和轴向范围更大的阻塞区域，这也导致了单棒实验结果与棒束实验结果之间存在偏差。实际事故下的流动阻塞可能会因在小模型无约束组件上的试验结果而被低估^[5]。

2.4 JAERI组件试验

20世纪70年代末至80年代初，在日本原子能研究院JAERI采用7×7小组件进行了多棒试验。栅格结构与日本15×15压水堆燃料组件相同。小组件的加热长度为0.9 m，内部加压范围为20~70 bar，由两个定位格架进行支撑^[6-7]。

7×7小组件试验采用了三种不同的外边界条件，并连续开展了三个系列试验，试验组件结构情况如图2所示。

1. 系列I（试验5~8）：紧密配合的带未加热护罩的试验。
2. 系列II（试验9~14）：32个未加压的外环加热棒保护下的小组件试验。
3. 系列III（试验15~24）：未加热护罩结合由32个保护加热棒组成外环的小棒束试验。

试验是在流量很低的蒸汽环境下进行的，该热工水力条件有利于产生较大的应变。通过比较第二个和第三个系列的结果，可以得出未加热护罩对变形的影响。在最后一系列的对比试验中也研究了控制棒导向管对变形的影响。最后一系列试验的主要目的是研究棒束实际边界条件对子通道中棒变形的限制影响。

JAERI组件试验提供的重要结果涉及控制棒导向管的存在的影响：在大多数情况下，尽管冷导向管引起周向温度梯度，但导向管附近棒的变形不低于其他棒，而且棒束截面的流动阻塞甚至略有增加，轴向上也进一步扩展。由于导向管的直径较大，变形的相邻棒在爆破前以中等应变（约20%）发生接触。这种较早的接

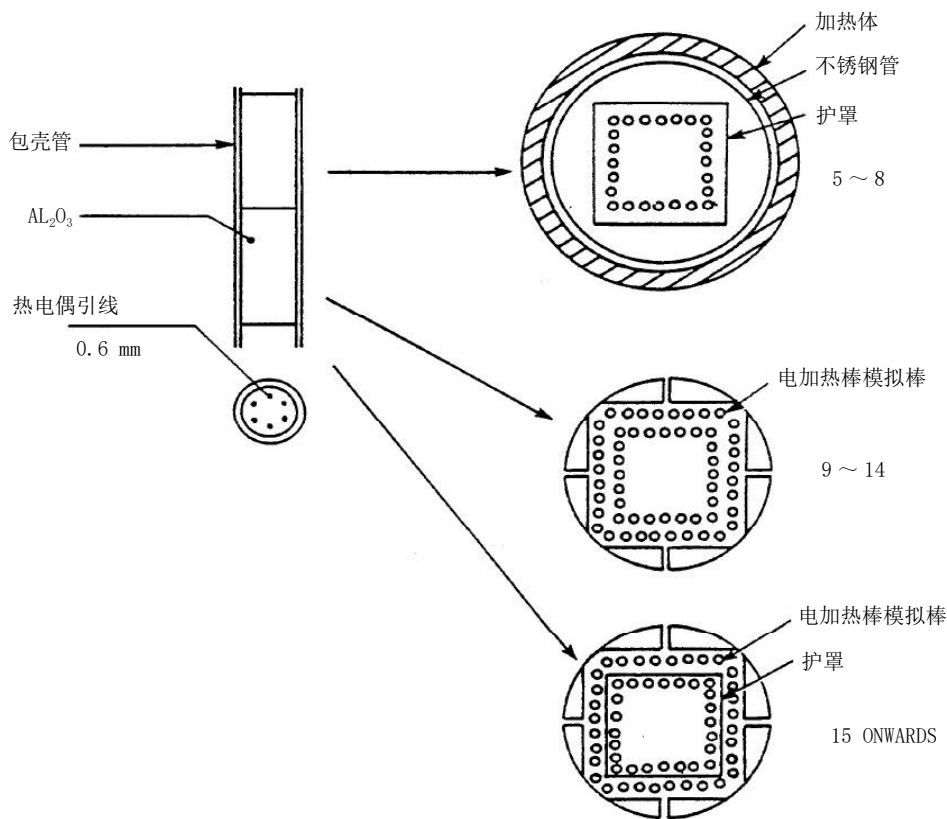


图 2 试验组件结构情况

触导致应变传递到棒圆周的其他部分，从而使周向温度场均匀化，导致变形的轴向扩展。

综上所述，棒束中的棒间机械相互作用（尤其是与导管向的相互作用）可能导致爆破应变和流动阻塞的增加。因此可以得出结论，在棒束内燃料棒之间显著机械相互作用的影响下，基于单棒的试验将无法真实地评估爆破应变的空间分布和所导致的流动阻塞。

3 结束语

本文通过调研国外的 LOCA 工况下堆外组件鼓胀爆破试验，明确了组件试验的试验方法，为掌握组件试验的相关试验技术奠定了理论基础，为后续进行国内组件试验提供了参考依据，为燃料组件流动阻塞率研究提供了支撑。

参考文献：

[1] 朱继洲, 悉树人, 单建强, 等. 核反应堆安全分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
 [2] Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems for Light-Water Nuclear Power Reactors[S]. U.S. Code of

Federal Regulations, Title 10, Part 50, Section 46.1974.

[3] Powers D. Cladding swelling and rupture models for LOCA analysis[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1980(04):128.
 [4] Wiehr K, Erbacher F J, Neitzel H J. Influence of a cold control rod guide thimble on the ballooning behaviour of zircaloy claddings in a LOCA[C]//Proceedings of a CSNI specialist meeting on safety aspects of fuel behaviour in off-normal and accident conditions, Espoo, Finland, 1-4 September 1980, 1981.
 [5] Chapman R H, Crowley J L, Longest A W. Effect of bundle size on cladding deformation in LOCA simulation tests[M]//Zirconium in the Nuclear Industry. ASTM International, 1984.
 [6] Suzuki M. Simulation test on interactions of zircaloy claddings deforming in fuel assembly under LOCA conditions[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1983, 20(06):475-490.
 [7] Kawasaki S, Uetsuka H, Furuta T. Multirods burst tests under loss-of-coolant conditions[R]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1983.