

用 ICARE2 程序模拟秦山核电厂熔渣床的形成

季松涛, 张应超

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413)

摘要:以小破口失水加全厂断电事故为例,用 ICARE2 V3mod1.3 程序分析严重事故早期压力壳内堆芯的破坏以及熔渣床的形成过程。分析结果表明:堆芯部件从 4 832 s 开始损坏后逐渐形成熔渣,并可清晰显示熔渣床的形成过程;在事故发生 10 000 s 后,总共形成约 30 000 kg 固态熔渣和 10 000 kg 液态熔渣。由于堆芯的冷却条件差,使得整个堆芯的损坏进程很快。

关键词:核电厂;严重事故;熔渣床

中图分类号:TL364.4

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2004)S0-0016-03

Simulation of In-vessel Debris Formation in Qinshan Nuclear Power Plant Using ICARE2 Code

J I Song-tao, ZHANG Ying-chao

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-64, Beijing 102413, China)

Abstract: The simulation of formation of debris bed from degraded fuel rods is performed in an accident sequence of SBLOCA with station blackout for Qinshan nuclear power plant using ICARE2 V3mod1.3. The calculation results show that the core starts to degrade from 4 832 s and the related formation of debris bed is simulated until 10 000 s when 30 000 kg solid debris and 10 000 kg liquid debris are produced. The analysis shows that the whole progress of core degradation is relatively fast due to poor core cooling conditions.

Key words: nuclear power plant; severe accident; core debris

核电厂严重事故一直是核安全研究的热点。作为严重事故研究成果之一的严重事故分析程序得到了快速发展,目前,已经可以作为严重事故研究的主要手段。总的来说,从功能上可将严重事故分析程序分成两大类:整体分析程序和机理性分析程序。整体分析程序(例如,美国 MELCOR 程序、法国 ESCADRE 程序)主要用于各种严重事故分析,如分析严重事故源

项、辅助制定严重事故预防和缓解措施等;机理性程序(例如,美国 SCDAP/RELAP5 程序以及本文采用的 ICARE2 程序等)主要用于了解严重事故过程中一些特殊物理现象的具体细节,如堆芯的损坏过程、裂变产物的迁移等。这些程序中详细的物理模型有助于人们对严重事故状态下出现的各种现象的认识。

ICARE2 程序是用于分析严重事故堆芯损

收稿日期:2004-04-15;修回日期:2004-05-18

作者简介:季松涛(1967—),男,江苏六合人,副研究员,博士,反应堆工程专业

坏过程的机理性程序,它可模拟严重事故早期堆芯部件的破坏过程和晚期堆芯熔渣床的形成过程。早期的 ICARE2 程序不能分析熔渣床的动态形成过程。例如在文献[2]中, ICARE 2.2.3 被用于分析秦山一期的小破口失水加全厂断电事故的早期堆芯损坏过程。本文采用最新的 ICARE2 V3mod1.3 程序,分析同一事故序列的晚期堆芯损坏以及熔渣床的形成。本文的目的之一是完善这一事故序列的分析;另一目的则是检验 ICARE2 程序目前处理晚期堆芯损坏的功能。

1 分析模型

本文采用的分析模型在文献[2]的分析模型基础上做了较大的改进。在分析模型中,压力壳内径向分为 6 个同心环,轴向分为 18 段。段和环的交叉网格形成计算单元。活性区分为 4 个等截面的环。在每个活性区环中定义了燃料组件(由 FUEL 和 CLAD 组件构成)、控制棒组件(由导管、包壳和吸收体组成);每个环有一流道(FLUID),有水蒸气流过,提供冷却,同时又造成了金属(锆和铁)与水的反应,生成氢气。为能模拟熔渣床的形成过程,在每个环中增加了 DEBRIS 和 MAGAMA 两种部件,它们分别代表固态和液态熔渣。分析模型中还模拟了压力壳的上、下封头以及堆芯的支撑构件。早期堆芯损坏的物理模型中包括力学模型、金属锆及铁的氧化模型等,其定义与文献[2]相似。在晚期堆芯损坏的物理模型中,考虑了熔渣床内的物质迁移行为、氧化等。

分析模型中部件的失效准则直接影响堆芯部件的失效过程,进而影响熔渣床的形成。本文分析模型中的主要部件关键失效准则定义与文献[2]中的相似。

本文采用的边界条件和初始条件与文献[2]中的相同,它们包括堆芯内的水位变化、堆芯内的水蒸气流率、堆芯的径向和轴向功率分布和总衰变热以及一回路内的压力变化等。

2 事故描述

事故开始时,一回路主管道的冷端发生 2.5 in 小破口,同时失去厂、内外电源,所有安全专设系统不能正常启动。该事故序列早期的

堆芯破坏过程已在文献[2]中进行过分析,本文的分析内容包括早期和晚期的堆芯损坏,重点分析堆芯破坏的晚期,即由破坏的堆芯部件动态地形成熔渣床的过程。

3 分析结果

3.1 热工水力响应

从图 1 所示 1.5 m 和 2.9 m 高度处包壳温度变化可以看出,在约 2 600 s 之前,堆芯仍淹没在水中,堆芯温度稳定在较低水平;随着堆芯水位下降、堆芯开始裸露,堆芯在衰变热和氧化热(在 10 000 s 时,因锆和铁的表面氧化及熔渣床的氧化总共产生 77 kg 的氢)的作用下,温度开始上升;环 2 和 3 的功率分布因子较大而造成 CLAD2 和 CLAD3 的温度比 CLAD1 和 CLAD4 的温度高;尔后,随着堆芯损坏和形成熔渣床,并部分堵塞中心流道,造成流量重新分配,致使大部分蒸汽从 FLUID4 流过,由此造成 CLAD4 的冷却条件比其他环为好,从而使得 CLAD4 的温

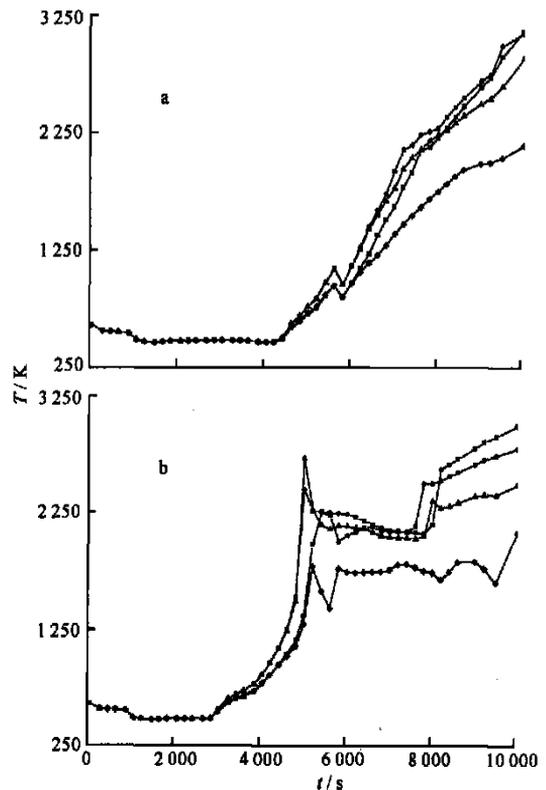


图 1 1.5 m(a) 和 2.9 m(b) 高度处的包壳温度

Fig. 1 Cladding temperature at elevation of 1.5 m(a) and 2.9 m(b)
—CLAD1; —CLAD2; —CLAD3; —CLAD4

度比其他的低(5 800 s后更为明显)。

3.2 堆芯损坏及熔渣床的形成

从计算中可以看出,包壳破坏次序的决定因素是堆芯的功率分布。在 4 462 s,CLAD2 的顶部首先破坏,其他的包壳破坏次序是 CLAD3 (4 471 s)、CLAD1(4 765 s) 以及 CLAD4(4 822 s)。在 4 832 s, FUEL2 中的燃料芯块首先坍塌(温度达 1 500 K)。

当堆芯部件发生破坏、坍塌后,坍塌的固态部件(燃料芯块等)在重力作用下向堆芯下部迁移直到遇到有效的支撑后停止。熔化的部件(金属材料和控制棒材料等)向堆芯下部移动,如果遇到有效的冷却,温度则降低,可能重新变

为固态并停止迁移。这种坍塌-迁移-停止过程,是熔渣床形成的主要机理。

图 2 所示的是坍塌的堆芯物质(固态和液态)占据的空间份额(图中的空白表示该处无熔渣),它们可直接显示堆芯的破坏以及熔渣床的形成过程。从图 2 可以看出:在 10 000 s 时,由于坍塌物质的迁移导致在堆芯的中心形成了一个空腔,这与三里岛严重事故中出现的情况相似;物质迁移使得堆芯底部熔渣的体积份额明显比堆芯上部的高。

堆芯中总的熔渣量示于图 3。在 10 000 s 时,总共形成了 40 000 kg 熔渣,其中,约 30 000 kg 固态熔渣,10 000 kg 液态熔渣。

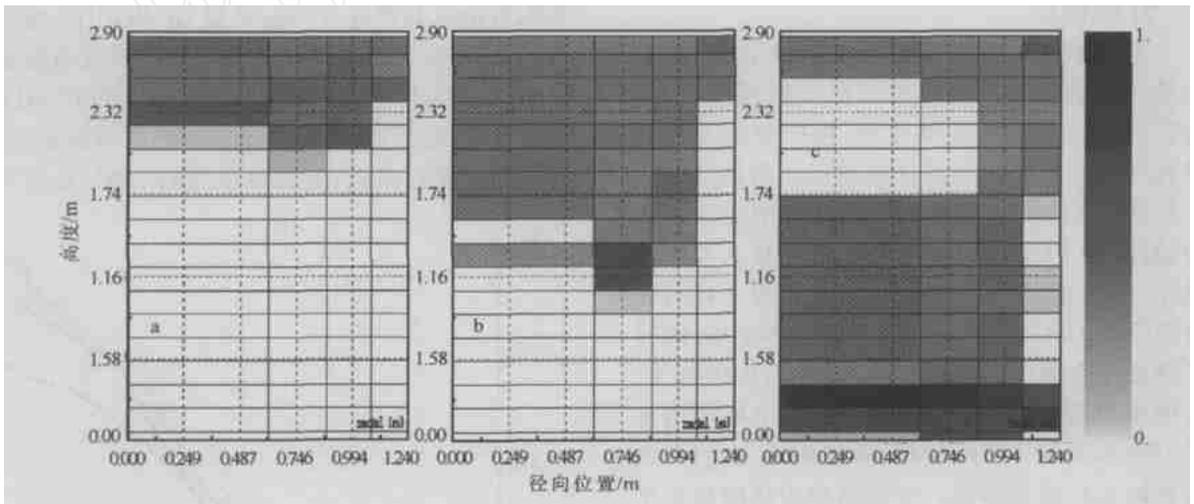


图 2 在 6 000 s(a)、8 000 s(b)、10 000 s(c)时熔渣(固态和液态)的体积份额

Fig. 2 Solid and liquid debris volumetric fraction at 6 000 s(a), 8 000 s(b) and 10 000 s(c)

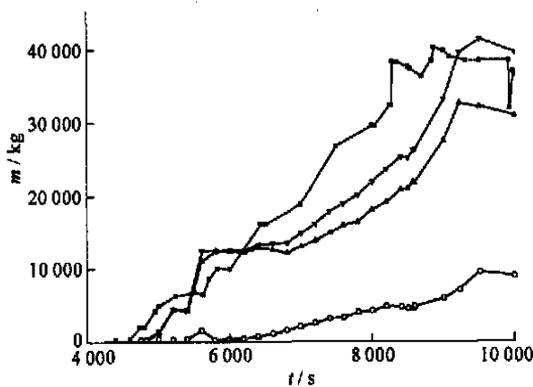


图 3 堆芯熔渣质量

Fig. 3 Debris mass

—总质量(MELCOR 程序计算); - - -总质量;
—固态质量; - - -液态质量

3.3 与 MELCOR 程序计算结果的比较

用 MELCOR1. 8. 5 程序对同一事故序列进行了比较分析。MELCOR 程序的分析模型采用与 ICARE2 分析模型相同的 4 个环,活性区采用 4 个节块模拟。MELCOR 程序分析结果表明:最早的燃料包壳损坏发生在环 2 的上部(4 125 s)。当包壳破坏后,将有部分衰变热随间隙释放的裂变产物释放到压力壳外,使得此后的压力壳内的衰变热比 ICARE2 计算的略少。从图 3 可以看出:MELCOR 程序预测的因堆芯损坏所形成的熔渣量和 ICARE2 程序计算的相似,而最主要的差别在于两个程序 (下转第 41 页,Continued on p. 41)

接近。这说明,对于本实验的高温多颗粒系统,由于球数不多,颗粒间的密集度不很高,高温颗粒之间的相互影响作用不大。至于高密度高温颗粒之间的耦合影响作用,在本实验系统中不能显现。

3 结论

本工作获得了钢球下落过程的清晰图象。初步数据分析结果表明:所有实验的冷、热钢球最终均平衡达到一稳定的终端速度;高温颗粒下沉速度明显高于冷态颗粒的速度;高温小球入水后作减速运动,小球温度越高,自由沉降末速越大;大直径钢球比小直径钢球的下落速度快,终端速度高;水过冷度低时,钢球的下落速度快。

参考文献:

- [1] Corradini ML, Kim BJ. Vapor Explosion in Light Water Reactor: A Review of Theory and Modeling [J]. Prog Nucl Energy, 1988, 22 (1): 1 ~ 117.
- [2] Corradini ML, Kim BJ. Vapor Explosion: A Review of Experiment for Accident Analysis [J]. Nuclear Safety, 1991, 32 (3): 337 ~ 362.
- [3] Yang Yanhua. Multi-phase Simulations for Phenomena in Vapor Explosions [D]. Tokyo, Japan: University of Tokyo, 1996.
- [4] Cao Xuewu, Yoshiharu T. Drag Correlations for a Hot Particles/Droplet With Vapor Film [J]. J Nucl Sci Technol, 2001, 38 (9): 721 ~ 728.
- [5] 李小燕,杨燕华,徐济黎. 水蒸汽爆炸粗混合阶段机理研究的实验设计[J]. 核动力工程, 2003, 24 (3): 285 ~ 288.
- [6] 李小燕,杨燕华,徐济黎,等. 蒸汽爆炸粗混合阶段冷液中高温球传热阻力耦合特性的实验研究[J]. 核动力工程, 2003, 24 (5): 421 ~ 425.

(上接第 18 页, From p. 18)

中采用的堆芯部件的破坏准则不完全相同。此外,作为整体分析程序, MELCOR 程序不能如 ICARE2 程序那样采用二维模式直观显示堆芯损坏及熔渣床的形成过程,这恰是 ICARE2 程序的优势之一。

4 结论

应用 ICARE2 V3mod1.3 分析了秦山 1 期核电厂的小破口失水加全厂断电严重事故,分析主要针对堆芯的损坏以及熔渣床的形成过程。分析结果表明:目前的 ICARE2 程序可清晰模拟堆芯的早期及晚期损坏,能够动态模拟熔渣床的形成及其熔渣床的行为。在 10 000 s 时,约形成了 40 000 kg 熔渣,其中,30 000 kg

固态熔渣,约 10 000 kg 液态熔渣。

有关该事故序列的进一步分析可考虑采用 CATHARE/ICARE 的耦合版本,也即用 CATHARE 程序计算热工水力分析取代目前计算中输入的边界条件和初始条件的方法,这样,可进行更为完整的严重事故堆内行为的分析。

参考文献:

- [1] Chatelard P, Fichot F, Guillard V. ICARE2 V3mod1.3 User's Manual: Technical Note SEMAR 03/54[R]. France: [s. n.], 2003.
- [2] 季松涛,张应超. 秦山核电厂小破口失水加全厂断电事故序列的堆芯早期破坏过程分析[J]. 原子能科学技术, 2000, 34(增刊): 82 ~ 85.