



先进核电技术与核安全系列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

核反应堆严重事故 机理研究

Nuclear Reactor Severe
Accident Mechanism
Research

佟立丽 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



先 进 核 电 技 术 与 核 安 全 系 列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

核反应堆严重事故机理研究

Nuclear Reactor Severe Accident
Mechanism Research

佟立丽 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书基于国际核反应堆严重事故研究的最新进展以及在核反应堆严重事故现象机理与分析方面的研究成果,讨论了下列内容:严重事故基本概念,压力容器内事故现象(堆芯熔化过程、熔融池的形成与冷却、高压熔堆),安全壳早期失效(安全壳直接加热,氢气的产生、流动、燃烧和爆炸,蒸汽爆炸等),安全壳晚期失效(MCCI、熔融物堆内或堆外滞留),裂变产物释放及迁移,严重事故典型现象分析方法(典型严重事故分析程序、缓解措施分析),严重事故管理指南,轻水堆严重事故实例及反思(三哩岛核事故、切尔诺贝利核事故、日本福岛核事故)等。

本书读者对象为高等院校核工程专业本科生、研究生,科研工作者,核电工程技术人员,以及希望了解该领域的其他人士。

图书在版编目(CIP)数据

核反应堆严重事故机理研究 / 佟立丽著. —上海:

上海交通大学出版社, 2016

核能与核技术出版工程

ISBN 978-7-313-13950-4

I. ①核… II. ①佟… III. ①反应堆事故分析 IV.

①TL364

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 242417 号

核反应堆严重事故机理研究

著 者: 佟立丽

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 山东鸿君杰文化发展有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 364 千字

版 次: 2016 年 4 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-13950-4/TL

定 价: 118.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 22

印 次: 2016 年 4 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0533-8510898

丛书编委会

总主编

杨福家 (复旦大学原校长, 中国科学院院士)

编委 (按姓氏笔画排序)

于俊崇 (中国核动力研究设计院, 中国工程院院士)

马余刚 (中国科学院上海应用物理研究所, 研究员)

马栩泉 (清华大学核能技术设计研究院, 教授)

王大中 (清华大学原校长, 中国科学院院士)

韦悦周 (上海交通大学核科学与工程学院, 教授)

申 森 (上海核工程研究设计院, 研究员级高工)

朱国英 (复旦大学放射医学研究所, 研究员)

华跃进 (浙江大学农业与生物技术学院, 教授)

许道礼 (中国科学院上海应用物理研究所, 研究员)

孙 扬 (上海交通大学物理与天文系, 教授)

苏著亭 (中国原子能科学研究院, 研究员级高工)

肖国青 (中国科学院近代物理研究所所长, 研究员)

吴国忠 (中国科学院上海应用物理研究所, 研究员)

沈文庆 (中国科学院上海分院, 中国科学院院士)

陆书玉 (上海市环境科学学会副理事长, 教授)

周邦新 (上海大学材料研究所所长, 中国工程院院士)

郑明光 (上海核工程研究设计院院长, 研究员级高工)

赵振堂 (中国科学院上海应用物理研究所所长, 研究员)

胡立生 (上海交通大学电子信息与电气工程学院, 教授)

胡思得 (中国工程物理研究院, 中国工程院院士)

徐步进 (浙江大学农业与生物技术学院, 教授)

徐洪杰 (中国科学院上海应用物理研究所原所长, 研究员)

黄 钢 (上海健康医学院院长, 教授)

曹学武 (上海交通大学机械与动力工程学院, 教授)

程 旭 (上海交通大学核科学与工程学院, 教授)

潘健生 (上海交通大学材料科学与工程学院, 中国工程院院士)

总 序

1896 年法国物理学家贝可勒尔对天然放射性现象的发现,标志着原子核物理学的开始,直接导致了居里夫妇镭的发现,为后来核科学的发展开辟了道路。1942 年人类历史上第一个核反应堆在芝加哥的建成被认为是原子核科学技术应用的开端,至今已经历了 70 多年的发展历程。核技术应用包括军用与民用两个方面,其中民用核技术又分为民用动力核技术(核电)与民用非动力核技术(即核技术在理、工、农、医方面的应用)。在核技术应用发展史上发生的两次核爆炸与三次重大核电站事故,成为人们长期挥之不去的阴影。然而全球能源匮乏以及生态环境恶化问题日益严峻,迫切需要开发新能源,调整能源结构。核能作为清洁、高效、安全的绿色能源,还具有储量最丰富、高能量密集度、低碳无污染等优点,受到了各国政府的极大重视。发展安全核能已成为当前各国解决能源不足和应对气候变化的重要战略。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》明确指出“大力发展核能技术,形成核电系统技术的自主开发能力”,并设立国家科技重大专项“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站专项”,把“钍基熔盐堆”核能系统列为国家首项科技先导项目,投资 25 亿元,已在中国科学院上海应用物理研究所启动,以创建具有自主知识产权的中国核电技术品牌。

从世界来看,核能应用范围正不断扩大。目前核能发电量美国排名第一,中国排名第六;不过核能发电的占比方面,法国占比约 74%,排名第一,中国仅约 2%,排名几乎最后。但是中国在建、拟建和提议的反应堆数比任何国家都多。相比而言,未来中国核电有很大的发展空间。2015 年为中国核电重启的关键年,据中国核能行业协会发布的最新数据显示,截至 2015 年 6 月底,中国投入商业运行的核电机组共 25 台,总装机容量为 2 334 万千瓦。值此核电发展的历史机遇期,中国应大力推广自主开发的第三代以及第四代的“快堆”、

“高温气冷堆”、“钍基熔盐堆”核电技术,努力使中国核电走出去,带动中国由核电大国向核电强国跨越。

随着先进核技术的应用发展,核能将成为逐步代替化石能源的重要能源。受控核聚变技术有望从实验室走向实用,为人类提供取之不尽的干净能源;威力巨大的核爆炸将为工程建设、改造环境和开发资源服务;核动力将在交通运输及星际航行等方面发挥更大的作用。核技术几乎在国民经济的所有领域得到应用。原子核结构的揭示,核能、核技术的开发利用,是 21 世纪人类征服自然的重大突破,具有划时代的意义。然而,日本大海啸导致的福岛核电站危机,使得发展安全级别更高的核能系统更加急迫,核能技术与核安全成为先进核电技术产业化追求的核心目标,在国家核心利益中的地位愈加显著。

在 21 世纪的尖端科学中,核科学技术作为战略性高科技学科,已成为标志国家经济发展实力和国防力量的关键学科之一。通过学科间的交叉、融合,核科学技术已形成了多个分支学科并得到了广泛应用,诸如核物理与原子物理、核天体物理、核反应堆工程技术、加速器工程技术、辐射工艺与辐射加工、同步辐射技术、放射化学、放射性同位素及示踪技术、辐射生物等,以及核技术在农学、医学、环境、国防安全等领域的应用。随着核科学技术的稳步发展,我国已经形成了较为完整的核工业体系。核科学技术已走进各行各业,为人类造福。

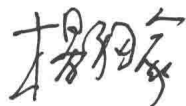
无论是科学研究方面,还是产业化进程方面,我国的核能与核技术研究与应用都积累了丰富的成果和宝贵经验,应该系统总结、整理一下。另外,在大力发展核电的新时期,也急需有一套系统而实用的、汇集前沿成果的技术丛书作指导。在此鼓舞下,上海交通大学出版社联合上海市核学会,召集了国内核领域的权威专家组成高水平编委会,经过多次策划、研讨,召开编委会商讨大纲、遴选书目,最终编写了这套“核能与核技术出版工程”丛书。本丛书的出版旨在:培养核科技人才;推动核科学研究和学科发展;为核技术应用提供决策参考和智力支持;为核科学研究与交流搭建一个学术平台,鼓励创新与科学精神的传承。

这套丛书的编委及作者都是活跃在核科学前沿领域的优秀学者,如核反应堆工程及核安全专家王大中院士、核武器专家胡思得院士、实验核物理专家沈文庆院士、核动力专家于俊崇院士、核材料专家周邦新院士、核电设备专家潘健生院士,还有“国家杰出青年”科学家、“973”项目首席科学家、“国家千人计划”特聘教授等一批有影响的科研工作者。他们都来自各大高校及研究单

位,如清华大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、上海大学、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国原子能科学研究院、中国核动力研究设计院、中国工程物理研究院、上海核工程研究设计院、上海市辐射环境监督站等。本丛书是他们最新研究成果的荟萃,其中多项研究成果获国家级或省部级大奖,代表了国内甚至国际先进水平。丛书涵盖军用核技术、民用动力核技术、民用非动力核技术及其在理、工、农、医方面的应用。内容系统而全面且极具实用性与指导性,例如,《应用核物理》就阐述了当今国内外核物理研究与应用的全貌,有助于读者对核物理的应用领域及实验技术有全面的了解,其他书目也都力求做到了这一点,极具可读性。

由于本丛书良好的立意和高品质的学术成果,使得本丛书在策划之初就受到国家的重视,成功入选了“十二五”国家重点图书出版规划项目。另外,本丛书也受到上海新闻出版局的高度肯定,部分书目成功入选了“上海高校服务国家重大战略出版工程”。

在丛书出版的过程中,我们本着追求卓越的精神,力争把丛书从内容到形式上做到最好。希望这套丛书的出版能为我国大力发展核能技术提供上游的思想、理论、方法,能为核科技人才的培养与科创中心建设贡献一份力量,能成为不断汇集核能与核技术科研成果的平台,推动我国核科学事业不断向前发展。



2015 年 11 月

前 言

核电厂的设计、建造和运行始终贯彻和遵守纵深防御的原则,在设备和措施上提供多层次的屏障与保护,确保有效控制核反应堆功率,充分冷却燃料组件,有效包容放射性物质。在整个设计和运行中贯彻纵深防御,以便对由厂内设备故障或人员活动及厂外事件等引起的各种瞬变、预计运行事件及事故提供多层次的保护。在各种运行状态下,在发生设计基准事故期间和之后,以及在发生所选定的超设计基准事故的工况下,都必须执行控制反应性、排出堆芯热量、包容放射性物质和控制运行排放以及限制事故释放三大基本安全功能。

但不可否认,核电厂可能由于多重故障或人因差错或外部灾害而导致发生超设计基准事故,造成堆芯严重损伤,进一步可能威胁安全壳的完整性,造成大量放射性释放。尽管核电厂发生严重事故的概率极小,但是,历史上已经发生的三哩岛核事故、切尔诺贝利核事故和福岛核事故表明,核安全工作必须扩展,必须考虑对反应堆严重事故的预防与缓解,对严重事故对策和处置必须进行强制性要求,核电厂必须制订严重事故管理指南,以满足社会各界对能源和安全日益增长的要求。

核电厂严重事故中反应堆堆芯发生损伤,导致一系列复杂的物理现象,并威胁反应堆压力容器和安全壳的完整性,同时可能引发大规模放射性物质泄漏。三哩岛事故和切尔诺贝利事故之后,严重事故研究受到主要核电国家的重视。2011年福岛核电厂事故后,世界各国更加重视核电厂严重事故的应对,对现役核电厂应对严重事故能力提出了新的要求,这对核电厂安全具有重要意义。

本书基于国际核反应堆严重事故研究的最新进展以及在核反应堆严重事故现象机理与分析方面的成果,深入讨论了以下内容:严重事故基本概念,压力容器内事故现象(堆芯熔化过程、熔融池的形成与冷却、高压熔堆),安全壳早期失效(安全壳直接加热,氢气的产生、流动、燃烧和爆炸,蒸汽爆炸等),安全壳晚期失效(MCCI、熔融物堆内或堆外滞留),裂变产物释放及迁移,严重事故典型现象分析方法(典型严重事故分析程序、缓解措施分析),严重事故管理指南,轻水堆严重事故实例及反思(三哩岛核事故、切尔诺贝利核事故、日本福岛核事故)。

核反应堆安全之严重事故现象涉及多学科领域,笔者在反应堆堆芯熔化凝固机理、蒸汽爆炸机理、氢气流动特性、氢气风险控制、核电厂严重事故措施分析及严重事故管理指南开发等方面积累了大量工作,将在本书中一并体现。

本书的读者对象为高等院校核工程专业本科生、研究生、科研工作者,核电工程技术人员以及希望了解该领域的其他人士。

佟立丽

2015 年 7 月

目 录

第 1 章 核反应堆严重事故基本概念	001
1.1 反应堆严重事故基本概念	001
1.1.1 严重事故定义	001
1.1.2 严重事故一般进程及主要现象	003
1.2 可能引起堆芯熔化的事故	006
1.3 严重事故研究的发展	011
1.3.1 严重事故现象机理研究	011
1.3.2 严重事故管理措施研究	015
参考文献	019
第 2 章 压力容器内事故现象机理	021
2.1 堆芯熔化过程	021
2.1.1 堆芯加热	021
2.1.2 氧化和氢气生成	021
2.1.3 堆芯材料的熔化	023
2.1.4 包壳失效	025
2.1.5 熔融物迁移与阻塞的形成	026
2.1.6 再灌水/骤冷	028
2.1.7 裂变产物释放	028
2.1.8 堆芯熔化相关现象实验研究	030
2.2 熔融池的形成	043
2.2.1 下封头中的主要现象	043
2.2.2 熔融物的组成与分层	047

2.2.3	硬壳-熔融物界面条件	047
2.2.4	熔融池的传热	049
2.2.5	一回路再淹没后的窄缝冷却	051
2.2.6	聚焦效应	052
2.2.7	临界热流密度	052
2.3	压力容器破裂	053
2.3.1	压力容器降级	053
2.3.2	下封头失效	056
2.4	高压熔堆	061
2.4.1	高压熔堆事故主系统自然现象	062
2.4.2	高压熔堆事故后果	064
2.4.3	高压熔堆事故的预防与缓解	064
	参考文献	068
 第3章 安全壳早期失效		071
3.1	安全壳直接加热(DCH)	071
3.1.1	DCH 的危害及主要物理现象	071
3.1.2	熔融物喷放	073
3.1.3	安全壳穹顶内的现象	075
3.2	氢气的产生、燃烧和氢气爆炸	077
3.2.1	严重事故产氢过程	078
3.2.2	氢气流动特性研究	079
3.2.3	氢气燃烧模式和可燃性判断	089
3.2.4	氢气缓解措施	102
3.3	蒸汽爆炸	105
3.3.1	蒸汽爆炸的主要过程	105
3.3.2	燃料与冷却剂相互作用实验研究	107
3.3.3	热细粒化实验研究	109
3.3.4	热细粒化机理模型研究	118
3.3.5	水力学细粒化机理模型研究	125
3.3.6	燃料与冷却剂相互作用相关数值模拟研究	128
3.4	安全壳隔离失效	132

参考文献	132
第 4 章 安全壳晚期失效	137
4.1 安全壳晚期失效模式	137
4.2 熔融物与混凝土相互作用	139
4.2.1 MCCI 的主要现象	139
4.2.2 MCCI 的主要实验项目	141
4.2.3 MCCI 中的传质传热	145
4.2.4 CORCON 程序模型	146
4.3 熔融物堆内及堆外滞留	151
4.3.1 熔融池顶部注水冷却	151
4.3.2 熔融物底部注水冷却	154
4.3.3 熔融物在水池中的冷却	155
4.3.4 熔融物堆内滞留策略	156
4.3.5 熔融物堆外滞留策略	157
参考文献	158
第 5 章 裂变产物释放及迁移	161
5.1 裂变产物的产生和释放	161
5.1.1 裂变产物的存积量和变化特性	162
5.1.2 间隙释放	165
5.1.3 压力容器内裂变产物的释放	165
5.1.4 压力容器失效	170
5.1.5 压力容器外裂变产物的释放	171
5.1.6 进气释放	172
5.1.7 压力容器内晚期释放	172
5.1.8 裂变产物释放模型	172
5.2 裂变产物的迁移	174
5.2.1 裂变产物在回路内的迁移	175
5.2.2 裂变产物在安全壳内的迁移	177
5.2.3 裂变产物迁移的实验研究	178
5.3 安全壳旁通	180

5.4	裂变产物释放的缓解措施	181
5.4.1	气溶胶的沉降过程	181
5.4.2	气溶胶沉降过程的其他影响因素	185
5.4.3	安全壳喷淋去除气溶胶	188
5.5	安全壳过滤排气	189
	参考文献	191
第6章	严重事故典型现象分析方法	193
6.1	典型严重事故分析程序	193
6.1.1	SCDAP/RELAP 程序	194
6.1.2	MELCOR 程序	201
6.1.3	MAAP 程序	206
6.2	典型严重事故缓解措施分析	210
6.2.1	主系统卸压分析	210
6.2.2	注水的间歇性流动特性研究	223
6.2.3	大型干式安全壳氢气风险控制	238
6.2.4	裂变产物释放迁移缓解分析	247
	参考文献	268
第7章	严重事故对策及管理	271
7.1	严重事故管理指南	272
7.1.1	严重事故管理指南的发展要求	272
7.1.2	世界各主要严重事故管理指南介绍	275
7.1.3	严重事故管理指南的制定	279
7.2	严重事故管理指南解读	283
7.2.1	严重事故诊断	285
7.2.2	指南的执行顺序	286
7.2.3	决策过程的辅助计算	288
7.3	严重事故缓解措施	288
7.3.1	主系统严重事故缓解措施	289
7.3.2	二次侧严重事故缓解措施	292
7.3.3	安全壳严重事故缓解措施	292

7.3.4 其他严重事故缓解措施	296
参考文献	296
第 8 章 轻水堆严重事故实例及反思	299
8.1 三哩岛核事故	299
8.2 切尔诺贝利核事故	305
8.2.1 RBMK-1000 反应堆主要特点	305
8.2.2 切尔诺贝利核事故经过	307
8.2.3 切尔诺贝利核事故原因分析	309
8.3 福岛核事故	313
8.3.1 福岛核电厂基本结构	313
8.3.2 福岛核电厂的主要安全系统	314
8.3.3 福岛核事故进程演变	317
8.3.4 福岛核事故后的安全改进	322
参考文献	323
附录 缩略语表	325
索引	329

核反应堆严重事故基本概念

核电厂的设计、建造和运行始终贯彻和遵守纵深防御的原则,能够对由厂内设备故障或人员活动及厂外事件等引起的各种瞬变、预计运行事件及事故提供多层次的保护。但是,在多重故障或人因差错或外部灾害情况下,核电厂也有可能发生超设计基准事故,造成堆芯严重损伤,进一步可能威胁安全壳完整性,造成大量放射性释放。因此,尽管核电厂发生严重事故的概率非常低,但由于其严重的事故后果,关于核电厂严重事故的研究一直是核电领域关注的焦点。同时,核动力厂设计安全规定中也明确指出:对于在设计该核动力厂时考虑过的所有可能事故,包括概率很低事故,要以高可信度保证任何放射性后果尽可能小且低于规定限值。所以,核电厂必须制订严重事故管理指南,考虑对反应堆严重事故的预防、缓解与处置,以满足社会各界对能源和安全日益增长的要求。

1.1 反应堆严重事故基本概念

1.1.1 严重事故定义

我国核电厂状态一般包括正常运行、预计运行事件、设计基准事故和严重事故四类,如图 1-1 所示为核动力厂状态。正常运行指核电厂在规定的运行限制和条件范围内的运行;预计运行事件指在核动力厂运行寿期内预计至少发生一次的偏离正常运行的各种运行过程,由于设计中已采取相应措施,这类事件不至于引起安全重要物项的严重损坏,也不至于导致事故工况。运行状态是正常运行和预计运行事件两类状态的统称。设计基准事故是指根据确定的设计准则,在设计中采取了针对性措施的一组有代表性的事故,并且该类事故中燃料的损坏和放射性物质的释放保持在管理限值以内。图 1-1 中①表

示没有明确的考虑作为设计基准事故,但可为设计基准事故所涵盖的那些事故工况;②表示没有造成堆芯明显恶化的超设计基准事故。

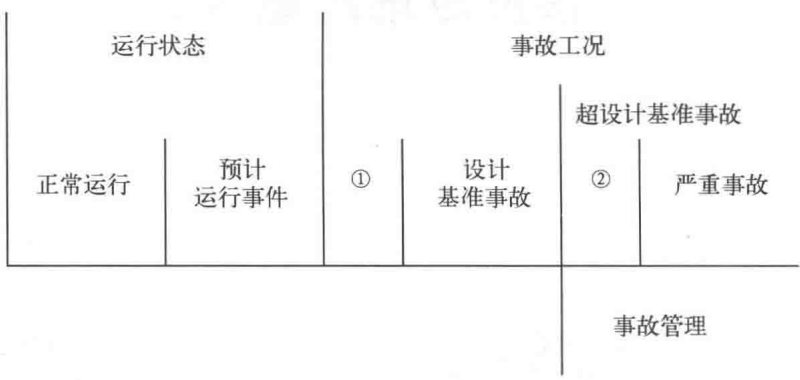


图 1-1 核动力厂状态

严重事故是指严重性超过设计基准的事故并造成堆芯明显恶化的事故工况。此外,放射性物质直接释放到环境中并对环境有明显影响的事故,或者由多个初因事件叠加而成的事故也属于严重事故。在严重事故发生的几小时内,由于设备或人为失误以及安全措施失效引发多重故障,将导致燃料元件的结构损坏。基于不同的事故初始条件和操纵员动作,不同的事故序列将导致一系列复杂的严重事故,并有可能最终导致安全壳完整性破坏,引发大量放射性物质释放到安全壳外的风险。因此,虽然严重事故发生的概率非常低,但是由于其严重的事故后果,对严重事故的研究一直是核电领域的焦点。

一般来说,核反应堆的严重事故可分为两大类:堆芯熔化事故和堆芯解体事故。堆芯熔化事故是由于堆芯冷却不充分,引起堆芯裸露、升温 and 熔化的过程,其发展较为缓慢,时间尺度为小时量级。堆芯解体事故是由于快速巨大的反应,引起功率陡增和燃料碎裂的过程,其发展非常迅速,时间尺度为秒量级。由于压水堆(pressurized water reactor, PWR)的固有负反应性温度反馈特性和专设安全设施,压水堆发生堆芯解体的可能性极小。

压水堆的堆芯熔化过程大体上分为高压熔堆和低压熔堆两大类。

1) 低压熔堆

低压熔堆过程从快速卸压的事故开始,如大、中破口失水事故。堆芯若丧失有效的冷却,则在不久后开始裸露和熔化。在系统低压情况下,忽略自然循环排出的堆芯余热,堆芯将在几乎绝热的条件下发生损伤。堆芯冷却剂汽化产生水蒸气,使得锆合金包壳与蒸汽反应产生大量的氢气,氢气不断地释放到

安全壳内,并与空气、水蒸气在自然对流的作用下进行混合,安全壳冷却措施的投入可能导致水蒸气的冷凝。低压熔堆过程中压力容器的上部温度相对较低,可以捕获裂变产物的蒸汽与颗粒,以避免其泄漏到安全壳。在整个堆芯升温 and 熔化坍塌过程中,安全壳负荷增加的可能性相对于高压过程要小很多。当熔融堆芯多孔介质熔穿堆芯下部支撑结构、塌落到下部区域的时候,可能增加安全壳负荷。压力容器熔穿后,熔融物分布到安全壳底板上,发生堆芯熔融物与混凝土的相互作用。不同的压水堆地坑有不同的安全壳底板熔融物接触区域,堆芯碎片可能扩展的范围是相当小的。总体上,由于没有蒸汽导致的压力上升,堆芯熔融物与混凝土的反应(干式)导致安全壳升压的可能性小于可冷却碎片情况(湿式)。

2) 高压熔堆

高压熔堆过程则往往以堆芯冷却不足开始,如丧失二次热阱事件、小小破口失水事故。在高压熔堆事故中,反应堆一回路系统处于持续高压状态,当压力容器下封头熔穿时,熔融物可能从压力容器下封头喷放到堆腔而发生高压熔融物喷放(high pressure melt ejection, HPME)。而后续喷放的饱和水、蒸汽、氢气可能推挤和挟带堆芯碎片离开堆腔,到达安全壳的其他区域,扩散的高温堆芯碎片挟带着热能和化学能(碎片氧化)可能直接迅速地加热安全壳内大气,甚至破坏安全壳完整性,导致非常严重的放射性释放后果,发生安全壳直接加热(direct containment heating, DCH)的险情。

1.1.2 严重事故一般进程及主要现象

1) 严重事故一般进程

当反应堆正常运行时,某种事件的发生触发反应堆停堆。停堆后,某些原因导致堆芯不能得到有效的冷却,堆芯余热无法排出,核燃料开始过热。燃料的锆合金包壳与水蒸气发生氧化反应,产生氢气并放出热量。随着堆芯的持续过热,水蒸气或氢气的不断产生,导致反应堆冷却剂系统(reactor coolant system, RCS)压力上升,诱发相关阀门开启进行系统卸压;由于堆芯过热,核燃料首先释放出挥发性的裂变产物,然后再释放出半挥发性的裂变产物。逐渐地,在堆芯处形成了一个金属熔融池,并且熔融物不断跌落到压力容器的下封头处。当跌落的熔融物与下封头处剩余的水接触后,两者相互作用,产生熔融物碎片。压力容器中的氢气和裂变产物被释放到安全壳中,氢气遇到氧气发生燃烧,导致安全壳内瞬时出现温度和压力的峰值,可能造成安全壳的破