

MCCI 过程中混凝土类型对安全壳的影响

石兴伟 兰 兵 毕金生 靖剑平 李朝君 张春明

(环境保护部 核与辐射安全中心 北京 100082)

摘要 堆芯熔融物-混凝土相互作用(Molten Corium-Concrete Interaction, MCCI)是安全壳晚期失效的重要影响因素之一,可能引起安全壳功能丧失并导致大量放射性物质向环境释放。因此有必要研究和分析混凝土类型对 MCCI 现象的影响,以评估 MCCI 过程中安全壳潜在的失效风险。应用严重事故一体化分析程序 MELCOR 2.1,建立了大功率非能动反应堆安全壳整体模型和堆坑模型,分别研究了熔融物与典型玄武岩混凝土和石灰石-沙混凝土的相互作用,评价了该作用对安全壳完整性带来的风险。分析结果表明:在 MCCI 过程中,两种典型类型的混凝土的消融速度明显不同,玄武岩混凝土具有更高的侧壁消融速度;但是石灰石-沙混凝土具有更高的不凝气体产气量。研究表明:安全壳底板失效时间远超过 24 h,与混凝土类型无关;计算得到的安全壳压力均低于 C 级承载压力,满足保护安全壳裂变产物边界 24 h 的目标。

关键词 MELCOR 2.1, 安全壳, 熔融物-混凝土相互作用, 不凝气体, 严重事故

中图分类号 TL364.4

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.040603

Effect of concrete type on containment during MCCI process

SHI Xingwei LAN Bing BI Jinsheng JING Jianping LI Chaojun ZHANG Chunming

(Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China)

Abstract [Background] Molten corium-concrete interaction (MCCI) would cause the containment to lose its protection function and result in considerable radioactive fission products release into atmosphere. [Purpose] This study aims to assess the potential failure risk of containment during MCCI process by investigating and analysis the effect of concrete type on the MCCI phenomenon. [Methods] The integrated containment and cavity models for large power passive reactor were built with MELCOR 2.1 code, a fully integrated, engineering-level computer code for severe accidents. The interactions of molten corium with typical basaltic concrete and limestone-sand concrete were investigated, respectively. The potential failure risk of containment due to the MCCI phenomenon was evaluated. [Results] The analysis results show that the ablation rates of those two typical kinds of concrete are apparent different during MCCI process, and the basaltic concrete has higher ablation rate on the side of the cavity than the limestone-sand concrete whilst the latter has more non-condensable gas production. [Conclusion] The failure time of containment basement far exceeds 24 h after MCCI starts, independent of the concrete type. All the calculation values of the containment pressure are below the pressure load level "C", which satisfies the goal in protection the fission products boundary for 24 h.

Key words MELCOR 2.1, Containment, MCCI, Non-condensable gas, Severe accident

国家科技重大专项项目(No.2013ZX06002001、No.2015ZX06002007)资助

第一作者: 石兴伟, 男, 1985 年出生, 2013 年于哈尔滨工程大学获博士学位, 研究领域为核动力安全分析

通信作者: 李朝君, E-mail: lichaojun@chinansc.cn

收稿日期: 2017-03-28, 修回日期: 2017-09-08

Supported by National Science and Technology Major Project (No.2013ZX06002001, No.2015ZX06002007)

First author: SHI Xingwei, male, born in 1985, graduated from Harbin Engineering University with a doctoral degree in 2013, focusing on safety analysis of nuclear power

Corresponding author: LI Chaojun, E-mail: lichaojun@chinansc.cn

Received date: 2017-03-28, revised date: 2017-09-08

压力容器熔穿后,堆芯熔融物和混凝土的相互作用(Molten Corium-Concrete Interaction, MCCI)成为长期危及安全壳完整性的重要因素^[1]。功能完备的安全壳不仅能够冷却 MCCI 过程产生的大量蒸汽,防止安全壳结构失效,而且能够阻止放射性裂变产物向环境释放。

针对 MCCI 进程,国外更加注重模拟方法和现象机理的研究,如半隐式粒子移动方法(Moving Particle Semi-implicit, MPS)的应用^[2-4]和二维 MCCI 的实验研究^[5]。而国内在现象机理和试验方面同样都进行了大量的研究。佟立丽等^[6-8]对不同模型下 MCCI 机理以及影响因素做了深入研究,获得了熔融物和混凝土之间的热阻模型以及熔池结构模型对混凝土消融速率有较大影响等结论。高泉源^[9]利用法国核安全与辐射防护研究院开发的计算程序 MEDICS 对大亚湾核电站全厂断电等典型初因事故导致的 MCCI 进程进行了计算和分析。魏巍等^[10]自主开发了用于模拟 MCCI 过程的仿真程序,并应用于模拟计算大亚湾核电机组两种典型严重事故序列下 MCCI 过程。于英俊^[11]基于欧洲压水堆(European Pressurised Water Reactor, EPR)堆型中牺牲混凝土类型,自主开发了硅铁和硅质两种不同类型的核牺牲混凝土,并通过试验模拟了高温熔融物与牺牲混凝土相互作用过程,揭示了高温性能演变机理。

目前,与二代反应堆相比,国内开发的先进非能动反应堆的功率和堆芯初始装量都相应提高。在压力容器失效情况下,堆芯熔融物喷放具有喷放总量大、喷放时间长的显著特点,对安全壳完整性的威胁程度也相应增大,因此有必要细化研究混凝土类型可能引起的安全壳功能性失效风险。

依据 MCCI 过程中安全壳的设计要求,安全壳丧失完整性应满足两个判据:熔穿安全壳钢壳和熔穿整个底板;不凝气体引起的安全壳升压危及安全壳完整性的判据是下封头对应的“C”级承载压力^[12]。本次研究使用美国核管会授权的严重事故一体化分析程序 MELCOR 2.1 建立了安全壳整体模型和堆坑模型,以堆芯熔融物喷放进入堆坑为边界条件,研究了熔融物与典型的玄武岩混凝土和石灰石-沙混凝土的相互作用,分析和评估了该作用对安全壳结构完整性和安全壳超压带来的风险。

1 MCCI 过程建模

1.1 MCCI 现象主要机理

在 MELCOR 2.1 程序中,CAV package 主要用于计算一个或者多个堆腔内的 MCCI 过程,其模型主要基于 CORCON-Mod3 程序^[13]。CAV package 可以对包含单层或者多层熔融物的堆腔进行对称建模,以计算熔融物对上层熔融物和下层混凝土的传热,以及不同层级熔融物之间的传热。在计算热量传输的同时,得到混凝土的消融速度和消融产物。

在混凝土稳态消融过程中,消融速度与传递到混凝土的热流密度成比例关系,其比值即为单位体积消融焓。熔融物与混凝土之间的热流密度用于计算堆腔壁面各个混凝土节点的消融速度,而新的时间点对应的壁面节点将会替代上一个计算节点。如图 1 所示,辐射线全部通过用户定义的原点,最后一条辐射线必须垂直于堆腔下地面并穿过位于下平面的节点。为了保证计算的稳定性,需要不断修正计算节点,即每一时间步长堆腔都会重新划分节点,将插值计算形成的新节点返回到最初划分的辐射线上。堆腔内壁面节点的重新划分必须沿辐射线分布,且时间间隔有严格限制。

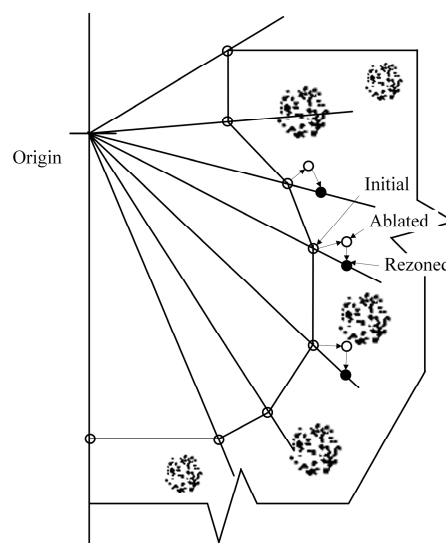


图 1 节点位置和移动
Fig.1 Position and motion of body points

MCCI 过程包含混凝土分解产物和熔融池内的金属之间的化学反应^[6-7,10]。化学反应采用化学平衡态假设,不考虑反应速度的影响。金属相、气相和氧化物相的计算基于最小化 Gibbs 方程,并重点考虑了两种独立的相互作用:1) 熔融物内部的相互作用,包含金属相层中气泡、混凝土分解氧化物与金

属层的相互平衡, 以及混合相层中的氧化物与气泡中水蒸气、 CO_2 的相互作用; 2) 金属层、金属层边界的气膜、金属氧化反应产物之间的相互平衡, 不包含混凝土分解氧化物。

水蒸气和 CO_2 为上述两种独立化学反应的气相反应物, 主要生成物为 H_2 和 CO , 但 CORCON 的平衡态计算表明还有少量碳氢化合物和游离氢原子产生。为了避免出现化学关系式的质量不平衡问题, MELCOR 采用最小化 Gibbs 方程以消除水蒸气、 CO_2 、 H_2 和 CO 至外的其他气相产物。

1.2 安全壳及堆坑建模

为了详细分析 MCCI 对安全壳带来的超压风险, 需要建立安全壳整体模型, 如图 2 所示, 大功率非能动反应堆安全壳节点划分, 其包含共 10 个控制容积和 24 个流道。

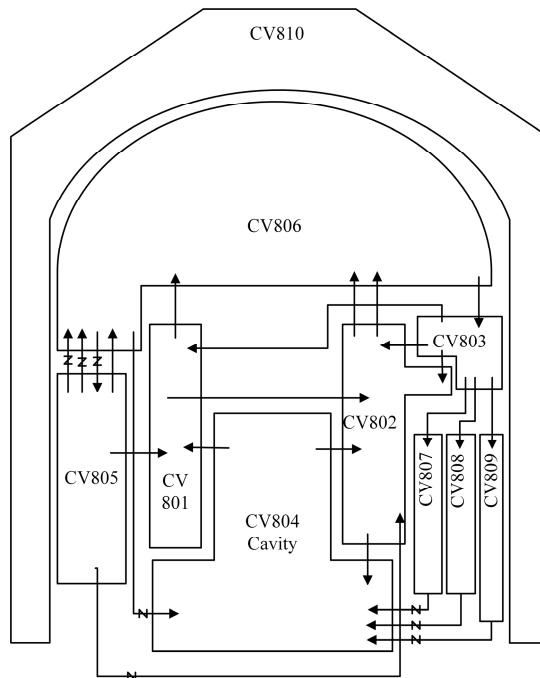


图 2 安全壳节点划分
Fig.2 Containment nodalization

反应堆堆坑位于安全壳底部控制体 CV804 内, 如图 3 所示。堆坑隔间为正八边形, 底部标高为 -9.0 m , 底板面积为 28.0 m^2 。隔间底部至安全壳钢衬的距离为 2.6 m , 钢衬内外两侧均为混凝土基体。如图 4 所示, 堆坑采用对称建模, 堆坑内表面划分为 13 个节点, 其中包含堆坑底部 5 个节点, 侧壁面 6 个节点, 圆角处 2 个节点。

1.3 初始条件及假设

CVH package 提供熔融物喷放时的热工边界条件, 而 DCH package 提供熔融物衰变热源。具体初始条件: 1) 安全壳内部压力 0.2 MPa , 温度 $50\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度 0.1 , N_2 含量 0.79 , O_2 含量 0.21 ; 2) 熔融物于 11450 s 从压力容器破口喷射进入堆坑, 喷射时间持续 11950 s , 喷射熔融物总质量为 175442.86 kg ; 3) 熔融物喷射时, 堆坑内液位标高 1.78 m ; 4) 氢气点火器失效; 5) 安全壳外非能动安全壳冷却系统正常运行。

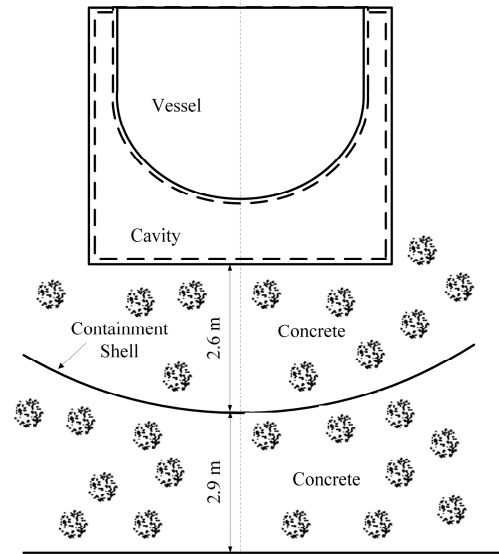


图 3 堆坑隔间示意图
Fig.3 Schematic diagram of cavity apartment

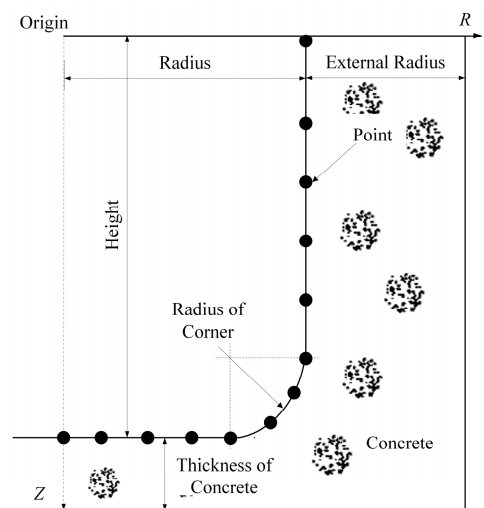


图 4 堆坑几何建模
Fig.4 Geometric modeling of cavity

2 MCCI 过程模拟

0 s 主回路热段小破口叠加非能动余热排出系统失效触发严重事故, ADS 1-4 级阀门、堆芯补水系统、安注系统相继成功开启, 主回路系统泄压成功; 由于堆腔淹没系统的启动失效, 在 11 450 s 时, 压力容器发生铰链式失效, 约 175 442 kg 堆芯熔融物跌入安全壳堆坑, 熔融物和堆坑内的水发生淬火反应, 导致大量不凝气体快速产生。同时, 混凝土受热分解产生的钙化物等固体被夹带入熔融物内后产生水蒸汽和 CO_2 。气体通过熔融物时, 被熔融物内存在的金属还原出部分 H_2 和 CO 。

混凝土的消融和产气量对混凝土的种类依赖性较大。模拟计算选取了两种类型的混凝土, 如表 1 所示, 即玄武岩混凝土和普通的石灰石-沙混凝土, 以分析 MCCI 进程。

表 1 CORCON 混凝土参数 (质量份额%)
Table 1 Concrete compositions of CORCON (in mass %)

成分 Composition	玄武岩混凝土 Basaltic concrete	石灰石-沙混凝土 Limestone-sand concrete
SiO_2	54.84	35.8
TiO_2	1.05	0.18
MnO	—	0.03
MgO	6.16	0.48
CaO	8.82	31.3
Na_2O	1.8	0.082
K_2O	5.39	1.22
Fe_2O_3	6.26	1.44
Al_2O_3	8.32	3.6
Cr_2O_3	—	0.014
CO_2	1.5	21.154
$\text{H}_2\text{O (chem)}$	2	2
CaCO_3	—	—
Ca(OH)_2	—	—
$\text{H}_2\text{O (evap)}$	3.86	2.7

如图 5 所示, 以堆坑壁面作为消融起始点, 对比堆坑底部和侧壁最大消融深度。通过分析混凝土的消融速度和消融深度可知: MCCI 前期, 由于熔融物内部含有的衰变热和玄武岩混凝土低分解能的物理特性, 使玄武岩具有更高的消融速率, 消融速度大于石灰石。本次计算中采用 CAV package 中默认的单层熔融物均匀混合模型。玄武岩混凝土消融产生较多的轻金属氧化物, 致使熔融物的组成发生变化, 由初始的密度较大的金属和氧化物组成的混合物, 逐渐变成密度较小的氧化物混合物。由于在混合物转换中, 需要考虑混合物上下表面的再凝固,

侧壁面的消融深度差异更加明显; 而石灰石-沙混凝土的底部和侧壁消融深度几乎相等。

压力容器失效后 24 h, 玄武岩混凝土被熔融物蚀 2.12 m; 石灰石-沙混凝土被蚀 1.80 m, 均未到达安全壳钢壳 2.6 m 的深度; 底板的熔穿所需时长均大于 7 d。基于上述分析, 得出结论: 1) 在 MCCI 过程中, 混凝土厚度设计满足保护安全壳裂变产物边界 24 h 的目标; 2) 无论选用何种类型混凝土, 导致裂变产物向大气释放的安全壳底板失效时间远超过 24 h。

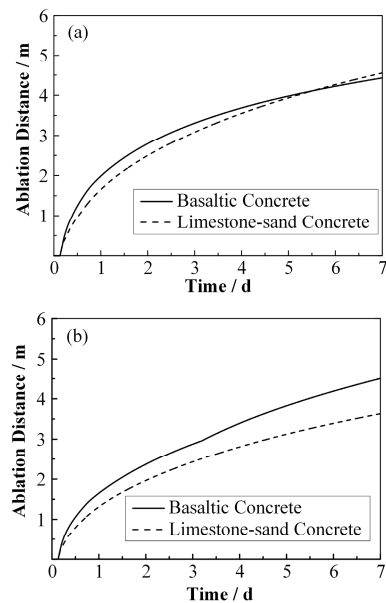


图 5 堆坑底部(a)和侧壁(b)最大消融深度
Fig.5 Maximum ablation depth of cavity bottom (a) and side (b)

3 结果分析

3.1 安全壳压力分析

在 MCCI 过程中, 需要对混凝土消融过程中产生的蒸汽和不可凝气体所引起的安全壳升压进行评估, 以确定 MCCI 对安全壳完整性的影响。对于 MCCI 产生的不可凝气体引起的安全壳升压, 判定其是否危及安全壳完整性的判据是对应“C”级承载压力。根据安全分析报告表述: “按照 ASME (American Society of Mechanical Engineers) 规范 C 级使用水准应力强度限值的确定性严重事故压力以及考虑顶封头失稳而采用的安全系数 1.67, 是由设备闸门盖和椭圆形封头的承载力决定的, 按照 ASME 规范案例 N-284 的 C 级使用准则条件计算, 椭圆形封头的最大承载力在常温 38 °C 时为 0.720 MPa, 在 150 °C 时为 0.626 MPa”^[12]。相比较

闸门盖和椭圆形封头,取常温最小承载压力,即 38℃ 时椭圆形封头的最大承载力 0.720 MPa。

图 6 为玄武岩混凝土和石灰石-沙混凝土 MCCI 过程安全壳压力变化趋势。与玄武岩混凝土不同,石灰石-沙混凝土与熔融物相互作用导致压力上升趋势明显,在事故发生 7 d 后,存在安全壳达到“C”级承载压力的风险。

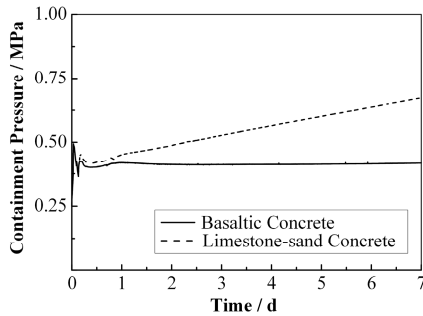


图 6 安全壳压力比较
Fig.6 Pressure comparison of containment

表 2 为玄武岩混凝土和石灰石-沙混凝土 MCCI 导致的安全壳升压比较。由于非能动安全壳冷却系统的成功启动,事故发生后 24 h,安全壳压力均低于安全壳设计压力 0.544 MPa;在模拟计算的 7 d 内,安全壳未达到“C”级承载压力。

表 2 安全壳压力判据比较
Table 2 Comparison of containment pressure criteria

	玄武岩混凝土 Basaltic concrete	石灰石-沙混凝土 Limestone-sand concrete
C 级承载压力 Pressure load level "C"	>168 h	>168 h
24 h 安全壳压力 Containment pressure after 24 h	0.416 MPa	0.456 MPa

3.2 安全壳内气体组分分析

为分析两种类型混凝土 MCCI 过程导致的安全壳压力响应的差异,需要对玄武岩混凝土和石灰石-沙混凝土 MCCI 产生的不凝气体进行分析。表 3 为 MCCI 过程中产生的水蒸气、CO₂、H₂ 和 CO 的质量对比。通过对比可知,两种类型混凝土与熔融物反应产生的气体在质量上存在较大差异。其中石灰石-沙混凝土消融过程产生水蒸气、CO₂ 和 CO 的质量远大于玄武岩消融产生的气体质量。

表 3 熔融物-混凝土作用产生的气体质量
Table 3 Gas mass from MCCI process

气体 Gas	玄武岩混凝土 Basaltic concrete / kg	石灰石-沙混凝土 Limestone-sand concrete / kg
Vapor	30 108	70 749
CO ₂	118 053	317 039
H ₂	2 075	789
CO	3 092	21 100

为进一步研究 MCCI 产生的气体对安全壳的影响,需要对安全壳内气体的摩尔份额进行分析,忽略安全壳内初始存在的 N₂ 和 O₂ 的影响。图 7 为安全壳内水蒸气、CO₂、H₂ 和 CO 的摩尔份额对比。图 7(a)为蒸汽在安全壳内的摩尔份额。压力容器失效前,事故的触发事件为冷却剂泄漏,所以蒸汽摩尔份额急剧上升,随着非能动安全壳冷却系统对钢制安全壳的冷却,蒸汽在安全壳内壁面冷凝并回流。由于在压力容器失效时,堆坑内含有大量泄漏的冷却剂,熔融物和冷却剂发生淬火反应,蒸汽摩尔份额出现第二次峰值。随着 MCCI 进程的开始,由于安全壳外壁面的持续冷却和其他不凝气体的产生,蒸汽摩尔份额逐渐下降。若在此过程中,非能动安全壳启动失效或者安全壳外壁面冷却不足,可能会导致安全壳内蒸汽压力急剧增加,安全壳会面临失效风险。

图 7(b)和(d)分别为 CO₂ 和 CO 的摩尔份额对比。从图 7(b)可知,石灰石-沙混凝土和熔融物相互作用产生大量的不凝气体 CO₂,CO₂ 在穿过熔融物时与金属发生还原反应,生成 CO。石灰石-沙混凝土消融过程安全壳内 CO₂ 的摩尔份额最大为 0.57,远大于玄武岩混凝土消融过程的 0.11。两种不凝气体成为安全壳不断升压的重要影响因素。

图 7(c)为安全壳内 H₂ 的摩尔份额。混凝土消融过程中产生的大量水蒸气在穿过熔融物时,与熔融物中的金属发生化学反应,产生 H₂。由于氢气点火器的失效,大量的 H₂ 在安全壳内大空间顶部聚集。混凝土消融过程产生的 H₂ 质量少于水蒸气、CO₂ 和 CO 质量,对安全壳升压的影响效果不显著,但水蒸气、H₂ 和 O₂ 的存在可能会发生 H₂ 燃烧或者爆燃,对安全壳存在潜在的威胁,必须启动氢气点火器或者氢气复合器。

通过对比两种混凝土消融产生的气体质量和安全壳内气体摩尔份额,得出熔融物与石灰石-沙混凝土相互作用产生的不凝气体质量高于玄武岩混凝土,因此也存在更高的可燃气体爆燃和安全壳超压的风险。

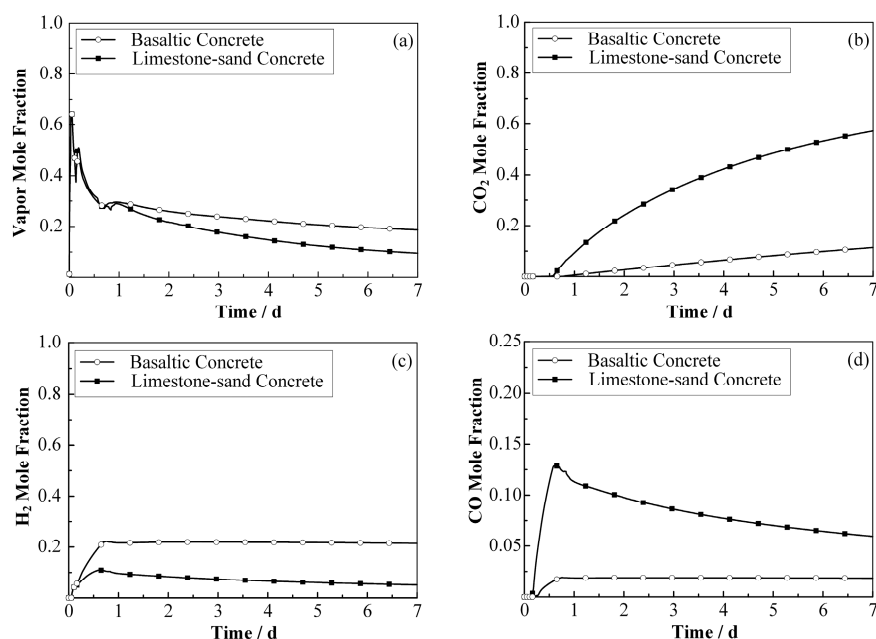


图7 安全壳内水蒸气(a)、CO₂(b)、H₂(c)和CO(d)摩尔份额对比
Fig.7 Mole fraction comparison of gas vapor (a), CO₂ (b), H₂ (c) and CO (d) in containment

4 结语

本次研究使用国际通用严重事故一体化分析程序 MELCOR 2.1 建立了大功率非能动反应堆安全壳整体模型和堆坑模型,以堆芯熔融物喷放进入堆坑为边界条件,模拟了熔融物与典型的玄武岩混凝土和石灰石-沙混凝土的相互作用,评估了该作用对安全壳结构完整性和安全壳超压所带来的风险。结果表明:

1) 压力容器失效后 24 h,玄武岩混凝土与石灰石-沙混凝土向下消融未到达安全壳钢壳的深度,混凝土厚度设计满足保护安全壳裂变产物边界 24 h 的目标;导致裂变产物向大气释放的安全壳底板失效时间远超过 24 h;

2) 压力容器失效后 24 h,安全壳压力均低于安全壳设计压力 0.544 MPa;在模拟计算的 7 d 内,安全壳未达到“C”级承载压力;

3) 相对玄武岩混凝土,堆芯熔融物与石灰石-沙混凝土相互作用产生的大量不凝气体,存在更高的可燃气体爆燃和安全壳超压的风险。

参考文献

- 1 朱继洲,奚树人,单建强,等.核反应堆安全分析[M].西安:西安交通大学出版社,2004:127-131.
ZHU Jizhou, XI Shuren, SHAN Jianqiang, *et al.* Nuclear reactor safety analysis[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004: 127-131.
- 2 Chai P H, Kondo M, Erkan N, *et al.* Numerical simulation

of MCCI based on MPS method with different types of concrete[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2017, **103**: 227-237. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.01.009.

- 3 Li X, Yamaji A. A numerical study of isotropic and anisotropic ablation in MCCI by MPS method[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2016, **90**: 46-57. DOI: 10.1016/j.pnucene.2016.03.001.
- 4 Li X, Yamaji A. Three-dimensional numerical study on the mechanism of anisotropic MCCI by improved MPS method[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, **314**: 207-216. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2017.01.025.
- 5 Spengler C, Foith J, Fargette C, *et al.* Transposition of 2D molten corium-concrete interactions (MCCI) from experiment to reactor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, **74**: 89-99. DOI: 10.1016/j.anucene.2014.07.009.
- 6 Tong L L, Cao X W, Li J X, *et al.* Model comparisons on molten core-concrete interactions[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2009, **20**: 251-256.
- 7 杨亚军.堆芯熔融物与混凝土相互作用及影响因素分析[D].上海:上海交通大学,2008.
YANG Yajun. Analysis of molten core-concrete interactions and its influence[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- 8 杨亚军,曹学武.严重事故下堆芯熔融物与混凝土相互作用[J].原子能科学技术,2008, **42**(5): 438-441.
YANG Yajun, CAO Xuewu. Molten core-concrete interaction under severe accident[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2008, **42**(5): 438-441.

- 9 高泉源. 核电站不同严重事故序列下的 MCCI 及其缓解措施计算分析[J]. 核动力工程, 2007, **28**(3): 103–106.
GAO Quanyuan. Calculations and analysis of molten core-concrete interaction and its mitigation measures under severe accidents[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, **28**(3): 103–106.
- 10 魏巍, 齐克林, 万舒, 等. MCCI 过程模型开发及验证[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(5): 849–853. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.05.0849.
WEI Wei, QI Kelin, WAN Shu, *et al.* Development and verification of MCCI process model[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(5): 849–853. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.05.0849.
- 11 于英伟. 核电牺牲混凝土与堆芯熔融物相互作用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
YU Yingwei. Study on the interaction between sacrificial concrete and melt corium (MCCI) in nuclear power plants[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- 12 Nuclear Regulatory Commission. Final safety evaluation report for AP1000 related to certification of the AP1000 standard design[R]. Washington DC: Nuclear Regulatory Committee, 2004.
- 13 Sandia National Laboratories. MELCOR computer code manuals Vol.2: reference manuals[R]. Sandia National Laboratories, Version 2.1.6840, SAND2015-6692 R, 2015.