

中国实验快堆虹吸破坏装置 两相流瞬变特性模拟研究

彭燕, 张东辉

(中国原子能科学研究院 快堆工程部, 北京 102413)

摘要:应用液钠-氩气两相流一维瞬态模型计算程序,模拟计算中国实验快堆一次钠净化系统堆外主管道发生大破口时的液钠流失量及系统压力变化过程,分析一些重要参数的变化对事故后果的影响。计算结果与实验数据的对比表明,该模型较好的描述了虹吸破坏装置的泄漏过程。

关键词:中国实验快堆;两相流;瞬态流动;管道

中图分类号:TL33 文献标识码:A 文章编号:1000-6931(2007)S0-0079-05

Simulation of Flow Transients Characteristics of Sodium/Argon Flow in Anti-siphon Equipment's Curve Pipeline of China Experimental Fast Reactor

PENG Yan, ZHANG Dong-hui

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-95, Beijing 102413, China)

Abstract: An argon-sodium two-phase flow analysis and simulation code, for one dimensional and unsteady two fluid flowing in a curve pipe, was used to simulate the whole two-phase flow process of the anti-siphon equipment pipeline leakage in China Experimental Fast Reactor (CEFR), primary sodium purification circuit; calculate the corresponded parameters, such as pressures, voidage and velocities; and analyze the effects with varieties of these parameters. Compared to the experimental data, this calculating model can correctly describe the phenomenon of leakage processes.

Key words: China Experimental Fast Reactor; two phase flow; transient flow; pipeline

中国实验快堆(CEFR)一次钠净化系统采用堆容器外布置方式^[1],即净化系统的主要设备(冷阱,电磁泵,阻塞计,省热器,阀门及连接管道等)都安置在堆容器外部,取钠管和回钠管在顶部穿过堆容器与钠池内液钠相通。因一次

钠净化设备标高低于钠池液位,一旦堆外管道发生破裂或断裂,就会通过虹吸作用将钠池内的液钠从破口排到堆外。为扼制断管事故时的排放速度和限制钠的总排放量,在净化系统取钠管上设置了虹吸破坏装置。装置原理图示于图1。

收稿日期:2007-05-08;修回日期:2007-07-01

作者简介:彭燕(1976—),女,山东文登人,工程师,硕士,核能科学与工程专业

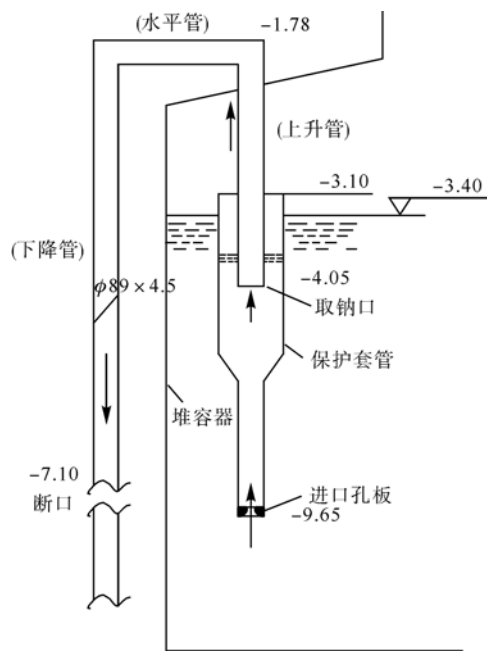


图1 CEFR虹吸破坏装置结构示意图

Fig. 1 CEFR anti-siphon equipment structure

虹吸破坏装置的工作原理是,当堆外管道断裂时通过断口向工艺房间排钠,此时系统钠流量大大增加,但由于取钠管的保护套管上设有孔板(标高-9.65 m),当系统流量增加时孔板压力损失增加,其后果是既限制了系统流量无限增加,同时使套管内钠的压力降低,为了弥补系统的钠流量,环隙液位不断下降,当取钠管下端头(标高-4.05 m)裸露后,堆容器内的氦气进入取钠管内,在取钠管管内形成液钠-氦气的两组份的两相流向堆外排放,这样既减少钠的排放速度,又使堆内氦气气腔压力不断降低,

最终破坏虹吸作用,停止液钠向堆外排放。

本工作使用自主开发的 THYMOS 计算程序^[2-4],模拟计算中国实验快堆一次钠净化系统堆外管道破裂时,取钠管内两相流特性及反应堆参数(气腔压力,钠池液位,液钠排放量,氦气排放速度、液钠排放速度等)随事故进程的变化情况。

1 计算结果分析

1.1 THYMOS 程序运算结果

THYMOS 程序计算条件为:气腔初始压力为 1.5×10^5 Pa;气腔体积为 101 m^3 ;钠池液面面积为 40 m^2 ;净化管路截面面积为 $0.005 027 \text{ m}^2$;液钠物性参数为, $t = 450 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho = 840 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 23.65 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$;氦气物性参数为, $t = 450 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho = 1.43 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 4.65 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$;事故工况下,主泵停止运转时初始液位差为 0.65 m 。

1.2 压力瞬态特性

图2示出瞬变过程中气腔与断口处的压力变化过程。由图2可见,气腔与断口处的压力变化趋势大体相同,泄漏末期压力接近大气压。

图3示出瞬变过程中泄漏初始时刻压力损失沿管道分布变化过程(弯管流动采用同一坐标系)。由图3可见,在垂直上升管段中,压力损失处于增大过程;当两相流动进入到水平管段中,压力损失有所减小,这种压力在水平管段中先下降再有所回升,即水平管段头部的压力损失大于水平管段尾部的压力损失,正是由于

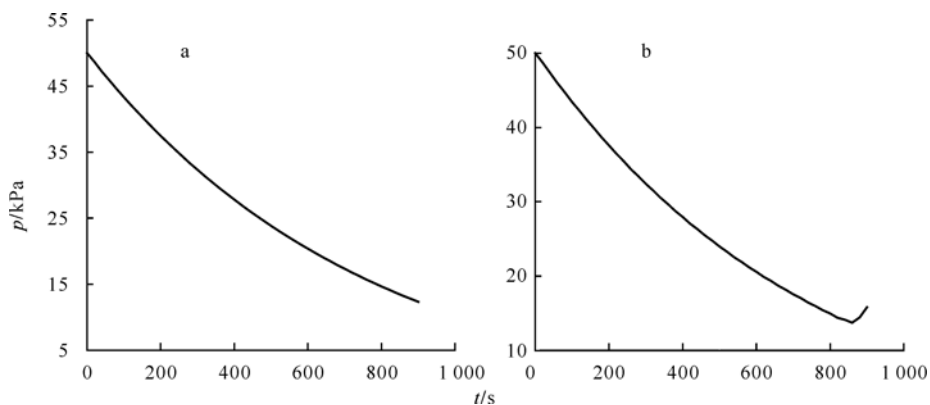


图2 气腔(a)与断口处(b)压力变化

Fig. 2 Plenum pressure (a) and breakpoint pressure (b)

分层流动的压降小于泡状流的压降所造成的这种现象;当两相流动进入到垂直下降管段中,压力损失沿管段逐渐减小,这是由于在垂直下降管段中,两相以环状液膜下降流型流动,为此压力损失相对较小。

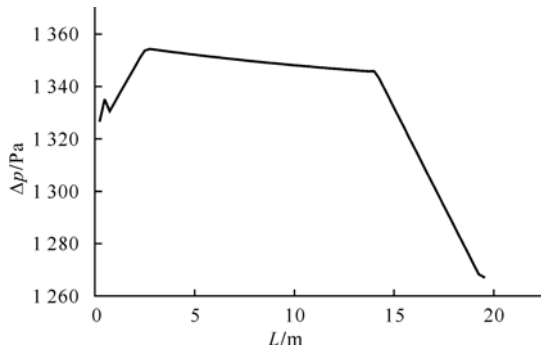


图 3 泄漏初始压力损失分布
Fig. 3 Pressure drop along pipeline at beginning of leakage

图 4 示出瞬变过程中临近泄漏终止时刻压力沿管道分布变化过程。由图 4 可见,在垂直

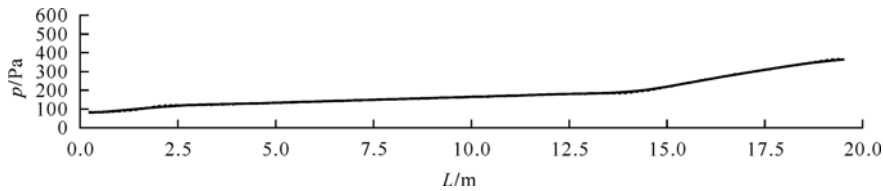


图 4 临近泄漏终止某时刻压力分布
Fig. 4 Pressure along pipeline near to the end of leakage

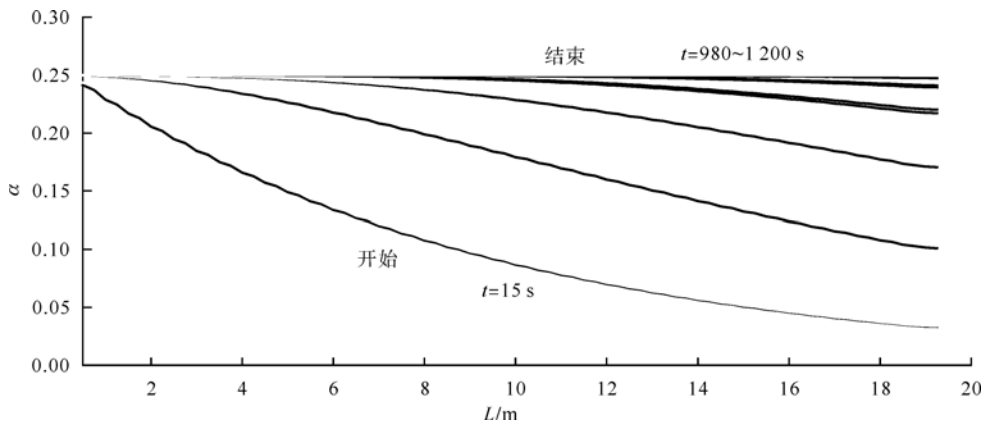


图 5 空泡份额沿管长方向分布
Fig. 5 Voidage along pipeline

上升管段中,压力处于上升过程,这是由于泄漏末期有一部分液相回落所造成的;当两相流动进入到水平管段中,压力缓慢上升;然后进入到垂直下降管段中,压力有所回升,在断口处压力值接近大气压。

1.3 空泡份额瞬态特性

图 5 示出两相流动的空泡份额在瞬变中沿管道分布的详细变化过程。由图 5 可见,空泡份额 α 在两相泄漏初期沿管段方向逐渐减小,随着泄漏过程进行到了泄漏中期,即氩气泄漏量逐渐增加,空泡份额 α 沿管道分布变化幅度变小,而后趋于一个稳定值,该值与取纳口结构有关。

1.4 液相速度瞬态特性

图 6 示出两相流动的液相速度在瞬变中沿管道分布的详细变化过程。由图 6 可见,液相速度在垂直上升管段中,液相速度处于相对稳定的流速;进入到水平管段中,液相速度经过第 1 个 90° 弯头时陡降而后趋于一个稳定流速;在垂直下降段中,经过第 2 个 90° 弯头后,液相速度有所升高,而后趋于一个稳定的流速。

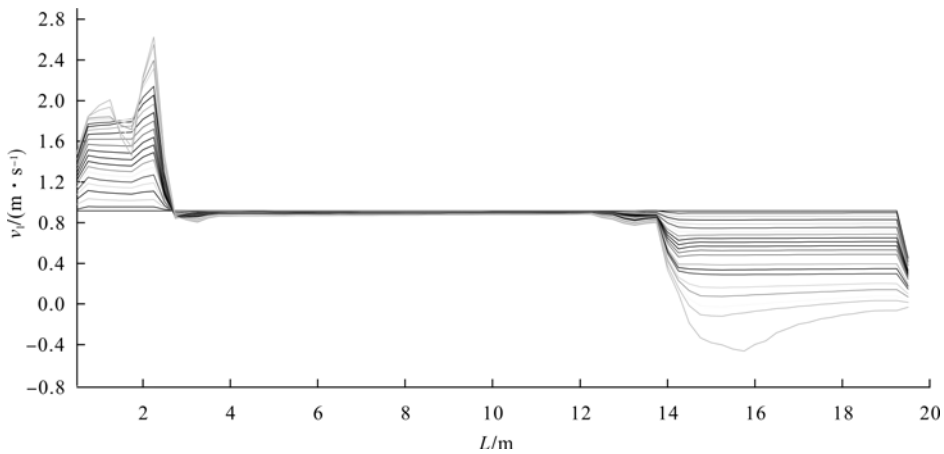


图6 液相速度沿管长方向分布
Fig. 6 Sodium velocity along pipeline

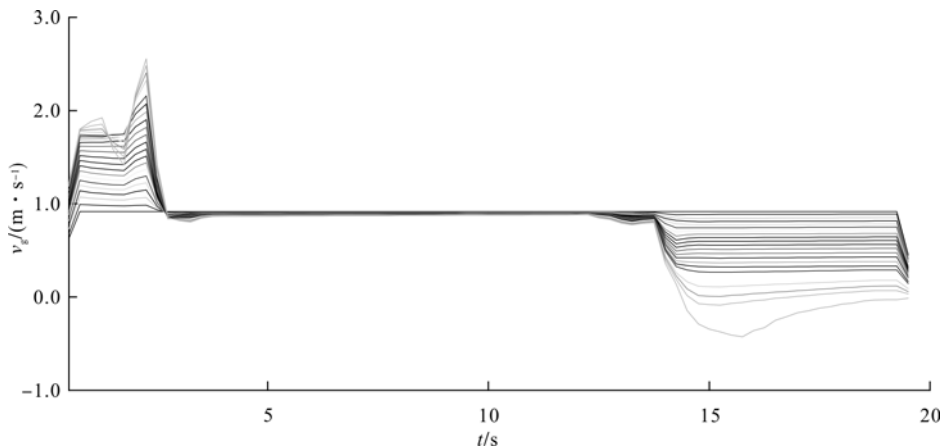


图7 气相速度沿管长方向分布
Fig. 7 Argon velocity along pipeline

1.5 气相速度瞬态特性

图7示出两相流动的气相速度在瞬变中沿管道分布的详细变化过程。由图7可见,在垂直上升管段中,气相速度处于相对稳定流速;在水平段中,气相速度经过第1个90°弯头时陡降而后趋于一个稳定流速;在垂直下降段中,经过第2个90°弯头后,气相速度有所降低,而后趋于一个稳定的流速。气相速度在弯管内分布类似于液相速度分布。

段、水平管段和垂直下降管段^[5]。

2 模型检验

图8示出CEFR虹吸破坏装置实验装置的结构。在该实验管路上进行了一系列的空气-水两相流瞬态实验。该管路由内径为φ80 mm的有机玻璃管组成,包括垂直上升管

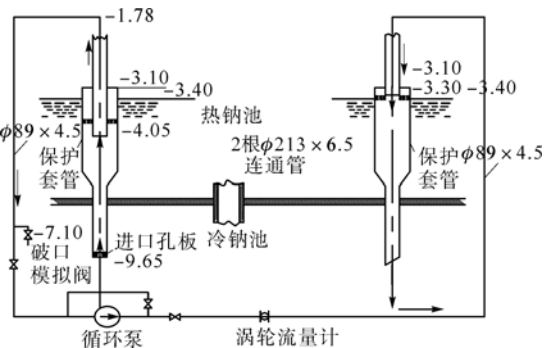


图8 CEFR虹吸破坏设计验证实验装置结构示意图
Fig. 8 CEFR anti-siphon design validation test facility

图 9 示出实验装置(改进装置,空气-水)在气腔压力为 48.62 kPa,初始气腔体积为 13.52 m³工况下,发生双端断裂事故压力变化的实验值与模型计算值比较。由图 9 可见,模型计算值与实验值最大误差不超过 5%,满足工程设计要求。

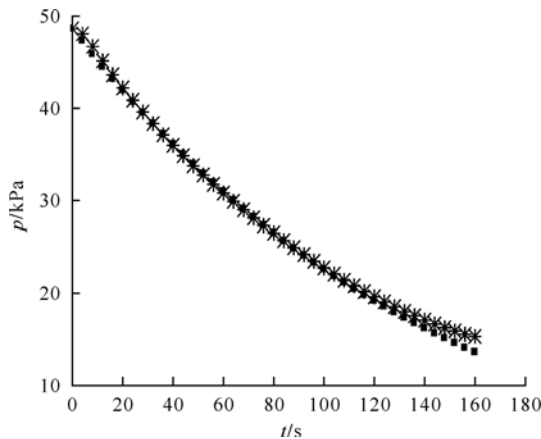


图 9 压力变化的实验值
与模型计算值比较

Fig. 9 Experimental pressure data
compared against numerical data

■——计算; * ——实验

3 结论

本工作建立了虹吸破坏装置事故状态下等温流动的气液两相流瞬态模型,应用数值模拟方法详细研究了事故工况下的气液(液钠与氩气)瞬态变化过程,同时将计算结果与实验数据进行比较。

程序运算结果如下:液钠泄漏量约为 4.785 6 m³;泄漏终止时堆内气腔压力约为 1.13×10⁵ Pa;泄漏终止时热池液位下降高度约为 0.12 m;泄漏持续时间为 980~1 200 s。

同时可以看到,虹吸破坏装置中液体的总流失量主要决定以下几种参数:1) 气体初始体积 V_G,气体初始体积大小与泄漏过程时间成正比,泄漏事故终止时,气腔压力基本上维持在 1.12×10⁵~1.15×10⁵ Pa;2) 系统阻力,增大系统阻力(即增大阻力系数)可以降低液体的泄漏量,尤其是改进取钠口结构(即增大气体泄漏面积和其阻力系数)可以降低液体的泄漏量;3) 液位高度,在保证系统正常运行时取钠口在最大净化流量下能够不裸露的前提下,减小液位高度可以降低液体泄漏量。

该模型较好的描述并计算出大破口泄漏流动过程中液相与气相的流失量,对工程的设计与应用做了充分的理论分析,起到了验证作用。

参考文献:

- [1] 张东辉. 钠冷快堆安全分析[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2002.
- [2] 徐济鳌. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京:原子能出版社,1993:49-51.
- [3] 鲁钟琪. 两相流与沸腾传热[M]. 北京:清华大学出版社,2002:27-32.
- [4] 林宗虎,王树众,王栋. 气液两相流和沸腾传热[M]. 西安:西安交通大学出版社,2003:15-28.
- [5] 丁振鑫. CEFR 虹吸破坏装置实验验证评审报告[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2005.