

AP1000 ADS-4 空气-水夹带试验研究

向延¹, 孙都成¹, 章静¹, 巫英伟¹, 张鹏², 秋德正¹, 苏光辉¹

(1. 西安交通大学核科学与技术学院, 陕西西安 710049;

2. 国核华清(北京)核电技术研发中心有限公司, 北京 100190)

摘要:为研究核电厂中 ADS-4 卸压夹带过程,以 AP1000 核电厂为原型设计建造了 ADS-4 喷放卸压试验回路 ADETEL。用高速摄像仪拍摄夹带起始和夹带率的试验过程,将试验数据与现有试验数据和模型进行对比。结果表明:ADETEL 试验数据和其他试验数据及理论模型之间存在较大差异;RELAP5 和 ATLATS 的夹带率模型不能准确估算 AP1000 核电厂中的 ADS-4 夹带量;当热管段内液位较低时,夹带量会随热管段内液位降低而迅速减小;夹带起始在小支管-主管直径比(d/D)工况下更容易发生;在相同的热管段相对液位下,AP1000 中 ADS-4 支管内液体的夹带率较 AP600 的低。

关键词:可视化试验;ADS-4;夹带率;夹带起始

中图分类号:TL333

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2015)08-1380-06

doi:10.7538/yzk.2015.49.08.1380

Experimental Investigation of ADS-4 Entrainment in AP1000 with Air-water

XIANG Yan¹, SUN Du-cheng¹, ZHANG Jing¹, WU Ying-wei¹,
ZHANG Peng², QIU Sui-zheng¹, SU Guang-hui¹

(1. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Beijing R&D Center of State Nuclear Power Technology Corporation, Beijing 100190, China)

Abstract: The ADS-4 depressurization and entrainment test loop (ADETEL) scaled with AP1000 as the prototype was constructed to investigate the entrainment process at the ADS-4 tee branch line. The experimental phenomenon of the onset of entrainment and the entrainment rate were recorded by a high speed camera. The data were obtained and compared with the existing data and correlations. The results show that large discrepancy between ADETEL experimental data and available data exists. RELAP5 and ATLATS correlations can not estimate the entrainment quality in AP1000 accurately. The entrainment rate declines rapidly with the decrease of liquid level in hot leg when the liquid level is low. The onset of entrainment is more likely to happen in smaller d/D (diameter ratio of branch to hot leg) conditions. The ADS-4 entrainment rate in AP1000 is lower than that in AP600 at the same dimensionless hot leg liquid level.

收稿日期:2014-04-01;修回日期:2014-12-19

基金项目:大型先进压水堆核电站重大专项资助项目(2011ZX06004-007)

作者简介:向延(1991—),男,湖北武汉人,硕士研究生,从事核反应堆热工水力与安全分析的试验研究

Key words: visualization experiment; ADS-4; entrainment rate; onset of entrainment

第4级自动降压系统(ADS-4)是 AP1000 非能动特性的重要组成部分,它可在小破口事故中为一回路提供可控的降压,为安全壳内置换料水箱(IRWST)重力安注提供条件。在小破口事故序列中,ADS-4 卸压管线上的爆破阀在堆芯补水水箱液位降至 20% 时自动开启,大量蒸汽经由卸压管线喷放至安全壳内^[1-2]。然而,在蒸汽排出的同时,大量冷却剂会被蒸汽夹带出去,导致一回路冷却剂存量减少,诱发堆芯裸露或堆芯熔化的严重事故。

前人对不同几何和工质的竖直向上 T 型管夹带进行了大量试验和理论研究,研究重点集中在夹带起始和稳态夹带率^[3-6]。Welter 等^[6]调研了已有 T 型管夹带的试验及关联式,发现试验中支管-主管直径比(d/D)普遍较低,与 AP600、AP1000 设计差距较大。文献^[7]利用空气-水对竖直向上 T 型管夹带进行了试验研究,试验中 d/D 与 AP1000 设计的相同,但 T 型管前后的流动发展长度较长,忽略了对压力容器和 ADS-4 支管距离的模化,试验数据可能会与真实工况存在较大差距。APEX 和 SPES 等^[2,8]综合性试验也进行了 ADS-4 卸压研究,但这些试验更加注重事故工况下核电站的整体响应,未对 ADS-4 夹带过程进行专门研究。此外,现有的系统程序如 TRACE、RELAP5 中采用的夹带模型不能准确估算 ADS-4 的夹

带量^[6]。APEX 试验中某些工况下发生了堆芯裸露,但由于 RELAP5 低估了 ADS-4 的夹带量,导致估算结果显示堆芯仍被冷却剂淹没^[6]。因此,为了还原 AP1000 中较大 d/D 几何的 ADS-4 夹带现象机理,需改进或开发新的适用模型,并对夹带现象作进一步的试验研究。文献^[6]中,空气-水试验与水蒸气-水试验的试验结果理论上相似,因此可采用空气-水模拟水蒸气-水进行试验。

本文以 AP1000 核电厂为原型,设计建造了 ADS-4 喷放卸压试验回路 ADETEL,用高速摄像仪对夹带起始和夹带率进行试验研究。

1 试验

1.1 试验回路

设计并建造了 ADS-4 喷放卸压试验回路(ADETEL)。以 AP1000 为原型,采用 H2TS 方法对 ADETEL 进行了模化分析^[9],直径比和高度比均取为 1:5.6。用空气-水和水蒸气-水介质对 AP1000 ADS-4 喷放卸压过程进行模拟。回路包含压力容器、1 条热管段和 1 条 ADS-4 喷放卸压管线。在第 1 阶段的试验中,热管段末端用盲端法兰封堵,用来模拟蒸汽发生器内液体容积造成的压力屏障。ADETEL 试验台架原理图如图 1 所示。试验台架中:旁通管线上的阀门用于调节进入试验段的空气流

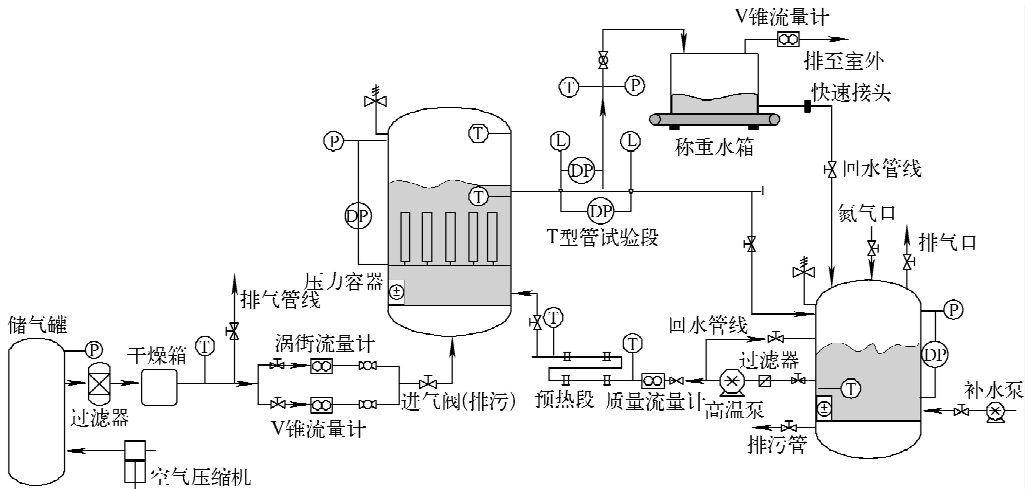


图1 ADETEL 试验台架原理图

Fig.1 Schematic of ADETEL test facility

量;两条空气流量测量管线用于测量不同量程气量;压力容器内部均匀布有13根多孔管,用于对空气流量进行分配;水进入到压力容器水腔室后会流经多孔板进行流量分配,然后进入压力容器上腔室内。压力容器材料为06Cr19Ni10,内径约为600 mm。在空气-水试验中,为了便于观测试验现象,试验段选用有机玻璃材料。捕集水箱内装有隔板,可起到汽水分离的目的。水箱底部装有4只称重传感器,用于测量夹带水量。回路是以空气-水作为试验介质,空气流量为0~700 kg/h,水流量为0~15 t/h,热管段液位高度为0~140 mm。

1.2 数据测量和采集

利用NI数据采集系统采集数据,用LabVIEW监测和保存试验数据。ADS-4支管上、下游的热管段液位均采用差压变送器测量。采用热电阻对回路中7处温度进行测量。

1.3 夹带起始判断方法

试验过程中,压力容器内液位振荡剧烈,振荡波能传播到热管段内。压力容器和ADS-4支管之间的流动发展长度较短,因此热管段内的气液两相流动不能充分发展。又由于气相流量较大,在气液界面引起较大的Kelvin-Helmholtz不稳定性。上述因素使得热管段内的夹带起始判断尤其困难。

当支管内存在较大液柱夹带时,会造成热管段和支管压差明显升高。如果压差升高后伴随着连续的夹带过程,就将压差升高时对应的热管段液位作为夹带起始液位。这种方法曾被Smoglie等^[3]所用。也可通过目测液滴或液柱在气液界面的产生作为夹带起始。然而,热管段内液位波动较大,试验过程中液滴或液柱的产生具有较大的随机性,液滴或液柱可能会从水波的波峰位置夹带起来,而热管段内平均液位仍低于夹带起始液位。因此,上述这些方法不适用于ADETEL试验工况。

Welter等^[6]采用了“自上到下”的方法判断夹带起始。热管段内首先充满水,恒定气流量,随着夹带的进行,热管段内液位持续降低直至夹带起始液位。但在试验中发现,在夹带过程初期,夹带量较大,间歇性夹带发生的频率较高,热管段内液位降低速率较快。当热管段内平均液位降至低于夹带起始高度

时,仍会有液滴或液柱间歇性地从支管夹带出去,但此时夹带量较小,夹带频率较低,液位降低速率显著减慢。本试验采用这种方法并通过热管段液位降低速率改变来判定夹带起始点。

1.4 试验现象

稳态夹带率试验中最为显著的特征是压力容器和ADS-4支管之间弹状流的出现,液弹在热管段中以某一频率间歇性出现。由于 d/D 较大,在支管入口处观测到了明显的液体回流现象,回流的液体减小了支管含气率,在某种程度上影响了夹带过程。夹带过程中,热管段ADS-4支管上、下游会形成一倾斜的气液交界平面,用以连接热管段内支管前后的不同液位。来自ADS-4支管上游的水从倾斜面爬升,然后碎裂成液柱和液滴,并在气相惯性力和压差作用下被夹带进入ADS-4支管。稳态夹带试验中,夹带过程具有明显的间歇性。一个完整的夹带过程如图2所示。图2a为两次夹带过程之间的间隔,此时热管段液位的变化幅值相对较小,随着液位的不断上升,一些液滴开始从气液界面分离(图2b)。热管段内液位继续升高,液柱开始夹带出去(图2c),支管入口处的回流现象变得明显,如图2c中箭头所示。支管含气率减小,热管段内压力开始升高。热管段和支管压差逐渐升高,更多的液体在压差驱动下从支管夹带出去,倾斜的气液交界面开始形成(图2d)。随着夹带过程的持续发展,热管段内支管前后液位差逐渐增大,液弹开始在支管下游形成(图2e)。热管段内压力由于支管内水的屏蔽作用持续升高,更多的气体被旁流,来自压力容器的气量开始减小。热管段内液位随着夹带进行不断减小,夹带过程逐渐减弱,连接支管前后液位的倾斜平面斜率逐渐减小,并最终消失(图2f)。

2 结果与讨论

2.1 夹带起始

将ADETEL试验数据与夹带起始模型的计算结果进行比较,如图3所示。由图3可看出,试验数据和各夹带起始模型曲线趋势相同,支管弗劳德数 Fr_d 随无量纲夹带起始气腔高度

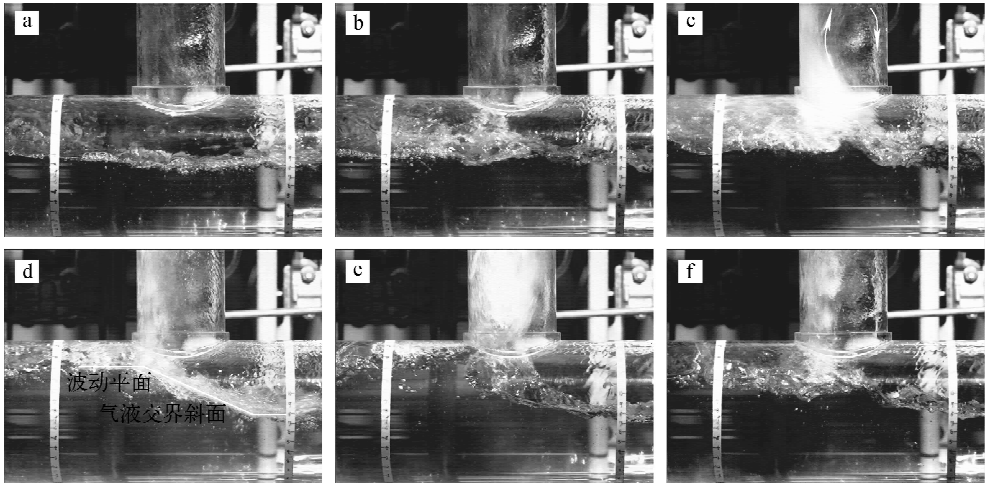


图2 间歇流态下的 T 型管夹带过程

Fig. 2 Tee branch entrainment process for intermittent flow

h_b/d 的升高而增大。然而, 试验数据和各模型间存在较大差距, 这主要是由于不同的支管-主管直径比和不同的 T 型管结构造成的。Smoglie 等^[3]的模型和 Schrock 等的^[4]模型估算结果接近, 且对于一定的 h_b/d , 其夹带起始点对应的 Fr_d 较低。值得一提的是, Smoglie 等开发的关联式被 RELAP5/MOD3.2 程序所采用^[10], 因此, RELAP5 程序不能准确估算 AP1000 中的夹带起始工况。

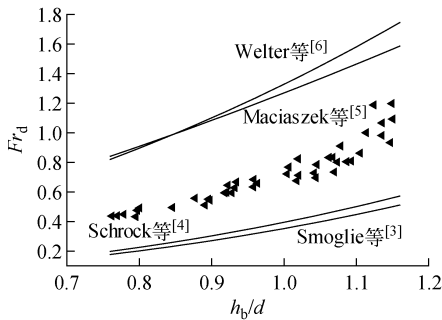


图3 ADETEL 试验数据与各夹带起始模型比较

Fig. 3 Comparison of ADETEL test data and entrainment onset correlations

ATLATS 模型与 ADETEL 试验回路具有较高的相似性, 并采用了相似的夹带起始判定方法。但比较结果发现, ADETEL 数据与 ATLATS 模型依然存在较大差距, 这主要是由于不同的 ADS-4 d/D 造成的。此外, Welter 等^[11]开发的模型是基于 ADS-4 上下游气量相

同的假设, 与试验工况存在较大不同, 是试验值与模型估算值不同的另一原因。

ADETEL 试验数据与相关试验数据的比较如图 4 所示。由图 4 可见, 各数据趋势相同, 夹带起始无量纲液位 h_1/D 随气相主管弗劳德数 Fr_D 的升高而减小。ADETEL 试验数据与文献^[7]的数据存在较大差距。文献^[7]中发生夹带起始需要的气流量更小, 这主要与夹带起始的判断方法和水平管段的流动工况有关。文献^[7]采用目测液滴出现判断夹带起始, 但因 ADETEL 热管段内液位波动较大, 这种方法并不适用。图 4 所示的 ATLATS 试验工况^[6]与 ADETEL 相似, 但两者的数据依然存在差异。ATLATS 以 AP600 为原型, d/D 较小, 导致在相同气量下的伯努利效应更显著, 具有更大的热管段和支管压差。因此, 夹带起始在小 d/D

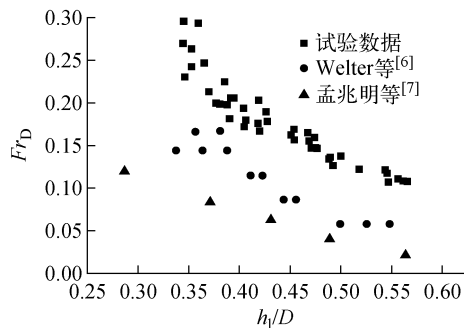


图4 ADETEL 试验数据与其他试验数据的比较

Fig. 4 Comparison of ADETEL test data and other relevant test data

工况下更易发生。这也证明 AP600 较 AP1000 更易发生夹带。

2.2 稳态夹带率

不同气量下 ADS-4 支管含气率 x_3 与无量纲气腔高度 h/D 的关系如图 5 所示。由图 5 可看出： h/D 随 x_3 的增加而增大，在低 x_3 范围内， h/D 随 x_3 增加较快，并在较高 x_3 范围内增长趋势逐渐减缓，因此，当热管段内液位较低时，液体夹带量会随液位降低而迅速减小；在相同 h/D 下，支管含气率随空气流量的增加而增大。

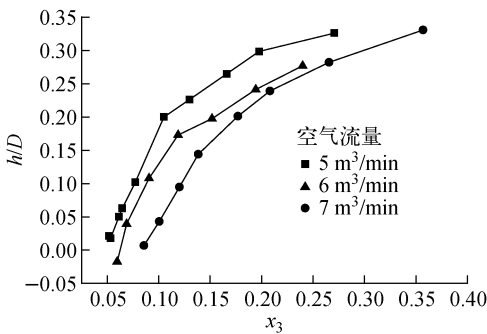


图 5 不同空气流量下的夹带率试验数据的比较
Fig. 5 Comparison of test data for entrainment rate under different gas flow rates

将 ADETEL 稳态夹带率试验数据和现有文献中试验数据与模型进行了比较，结果如图 6 所示。由图 6 可见，ATLATS 夹带率模型和 ATLATS、Smoglie、Schrock 等试验数据吻合较好。然而，ADETEL 试验数据与模型存在较

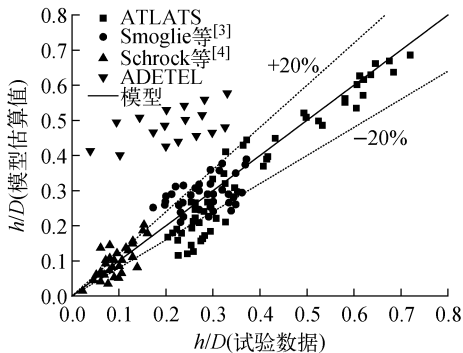


图 6 试验数据与 ATLATS 夹带模型的比较
Fig. 6 Comparison of test data and ATLATS entrainment rate correlations

大差异，模型估算值和试验数据的相对误差超过 20%。因此，基于 AP600 ADS-4 结构建立的夹带率模型不能准确估算 AP1000 下 ADS-4 的夹带量。ADETEL 试验数据得到的 h/D 小于 ATLATS 试验数据及模型的计算值，表明在相同的热管段相对液位下，AP1000 中 ADS-4 支管内含气率更高。

3 结论

ADS-4 支管和压力容器之间流动发展长度较短，且由于气相的剪切作用，导致热管段内液位振荡剧烈。在稳态夹带率试验中，ADS-4 支管上下游热管段液位明显有分层现象，在 ADS-4 支管下方形成气液交界斜面连接支管前后液位。由于 d/D 较大，在支管入口处有明显的液体回流现象，减小了支管含气率，在一定程度上影响了 ADS-4 卸压和夹带过程。

ADETEL 试验数据与现有试验数据及模型相差较大，这主要是因为水平管段流动工况和试验段 ADS-4 的不同 d/D 比例造成的。由于试验数据与 Smoglie 等开发的夹带起始模型相差较大，因此 RELAP5 程序不能准确估算 AP1000 中 ADS-4 支管夹带起始工况。夹带起始更容易在较低的 d/D 结构内发生。ADETEL 试验数据和 ATLATS 模型估算值相差大于 20%，因此 ATLATS 模型不能准确估算 AP1000 ADS-4 夹带量。在相同的热管段液位下，AP1000 中 ADS-4 支管内含气率更高，适用于 AP1000 及 CAP1400 等结构和工况的夹带模型开发将在后续工作中开展。

参考文献：

- [1] WANG W W, SU G H, QIU S Z. Thermal hydraulic phenomena related to small break LOCAs in AP1000 [J]. Progress in Nuclear Energy, 2011, 53(4): 407-419.
- [2] 林诚格. 非能动安全先进压水堆核电技术[M]. 北京:原子能出版社,2008.
- [3] SMOGLIE C, REIMANN J, MULLER U. Two-phase flow through small breaks in a horizontal pipe with stratified flow [J]. Nucl Eng Des, 1987, 99: 117-130.
- [4] SCHROCK V E, REVANKAR S T, MANNHEIMER R, et al. Small break critical

- discharge; The roles of vapor and liquid entrainment in a stratified two-phase region upstream of the break, NUREG/CR-4761, LBL-2204 [R]. US: Nuclear Regulatory Commission, 1986.
- [5] MACIASZEK T, MICAELLI J C. CATHARE phase separation modeling for small breaks in horizontal pipes with stratified flow [J]. Nucl Eng Des, 1990, 124: 247-256.
- [6] WELTER K B. Liquid entrainment at an upward oriented vertical branch line from a horizontal pipe[D]. US: Oregon State University, 2003.
- [7] 孟兆明,刘丽芳,王来顺. T型管夹带起始实验研究[C]//第13届反应堆热工流体学术年会. 上海:[出版者不详],2013.
- [8] REYES J N, GROOME J T, LAFI A Y. Final report of NRC AP600 research conducted at Oregon State University, NUREG/CR-6641 [R]. US: Nuclear Regulatory Commission, 1999.
- [9] SUN D C, TIAN W X, QIU S Z. Scaling analysis of AP1000 ADS-4 entrainment and depressurization[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 74: 71-78.
- [10] The RELAP5 Code Development Team. RELAP5/MOD3 code manual [M]. US: Nuclear Regulatory Commission, 1995.
- [11] WELTER K B, WU Q, YOU Y. Experimental investigation and theoretical modeling of liquid entrainment in a horizontal tee with a vertical-up branch[J]. Int J Multiphase Flow, 2004, 30: 341-360.