

加速器驱动系统靶区流动可视化研究

陈海燕¹, 程旭², 徐长江¹

(1. 中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413;
2. Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, Germany)

摘要:在加速器驱动次临界系统(ADS)靶件模型上进行二维流动可视化研究。示踪粒子为直径0.5 mm的聚苯乙烯球状颗粒,采用片激光法对流场进行显示和 Kappa CCD 数码摄像系统对流场进行实时拍摄,获得了 ADS 靶区的流型图。

关键词:加速器驱动系统;嬗变靶;流动可视化;片激光;流型

中图分类号: TL503.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2002)02-0175-03

Flow Visualization of Spallation Target in Accelerator-driven Subcritical Reactor System

CHEN Hai-yan¹, CHENG Xu², XU Chang-jiang¹

(1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-59, Beijing 102413, China;
2. Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, Germany)

Abstract: Flow visualization is made in a 2-D full-scale model test section of the ADS target window design, using water as the working fluid. Flow patterns around the simulated target beam window are visualized by laser light sheet with polystyrene spherical pellets (0.5 mm in diameter) as the tracer particles, and recorded with high resolution CCD camera. In the paper the principle and technique of flow visualization with laser light sheet are presented, the obtained flow pattern images are given and discussed.

Key words: accelerator-driven system; spallation target; flow visualization; laser light sheet; flow pattern

加速器驱动次临界系统(ADS)以强流加速器产生的高能质子轰击中子产生靶作为外中子源,启动次临界堆,通过裂变反应将超铀次量纲系核素和长寿命裂变产物嬗变为短寿命或稳定核素,且产生的热量还可用于发电。因此,ADS为嬗变高放废物提供了一条洁净、安全的途径,

是目前国际上的研究热点。

在 ADS 中,中子产生靶是关键部件之一,它承受高的热流和辐射。针对靶件及其质子束窗的设计,需要进行靶区中子物理、传热学与流体力学、化学、材料及其力学等方面的研究。本工作通过对以水为介质的二维/三维靶区模型

收稿日期:2001-03-22;修回日期:2001-06-15

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999022606)

作者简介:陈海燕(1963—),男,浙江东阳人,研究员,博士,反应堆工程与反应堆安全专业

的流动可视化研究、流场和温场的数值模拟与实验测量,为靶区的最佳设计提供依据。在此,主要涉及靶区流动可视化研究。

1 ADS 及其靶件

在现有各种 ADS 概念设计^[1]中,图 1a 所示为一典型的 ADS。该系统由加速器、散裂靶和次临界堆芯 3 个主要部分组成。加速器产生的高能质子束经真空管被导向散裂靶。散裂靶由铅或铅-铋合金组成,受高能质子轰击产生散裂中子,引发次临界堆芯内的裂变材料发生持续连锁反应。次临界堆芯浸没在冷却剂池内(冷却剂为液态铅或铅-铋合金),堆芯产生的热量以非能动自然循环方式经中间热交换器传给二次侧冷却系统。选用液态铅或铅-铋合金作靶材和冷却剂,是因为这两种材料具有好的传热性能和高的中子产生率。ADS 无须专设安全停堆机构(如控制棒),只需关闭加速器,即可停止裂变反应,而且,ADS 在非自持连锁反应

模式下运行,大大降低了发生反应性临界事故的风险。

真空质子束流管出口端为一半球面质子束窗,用于隔离束流管和散裂靶。ADS 中的质子束窗表面热负荷很高,解决质子束窗的冷却问题是 ADS 散裂靶设计中的一技术难题。图 1b 所示的靶件是德国卡尔斯鲁厄研究中心(FfK)、美国洛斯-阿拉莫斯国家实验室(LANL)和俄罗斯物理与动力工程研究院(IPPE)联合提出的 1 MW 试验性液态铅-铋合金靶件设计方案^[2]。本研究工作基于该方案。

2 实验装置与流动观测方法

实验在水回路(图 2)上进行。该回路运行压力为常压,最大流量 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 。实验段(图 1b)为二维有机玻璃靶件模型,由一中央矩形流道($130 \text{ mm} \times 128 \text{ mm}$)、2 个相同的侧面矩形流道($130 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$)和顶部质子束窗(半圆柱,半径为 55 mm)组成,总高度为 860 mm 。

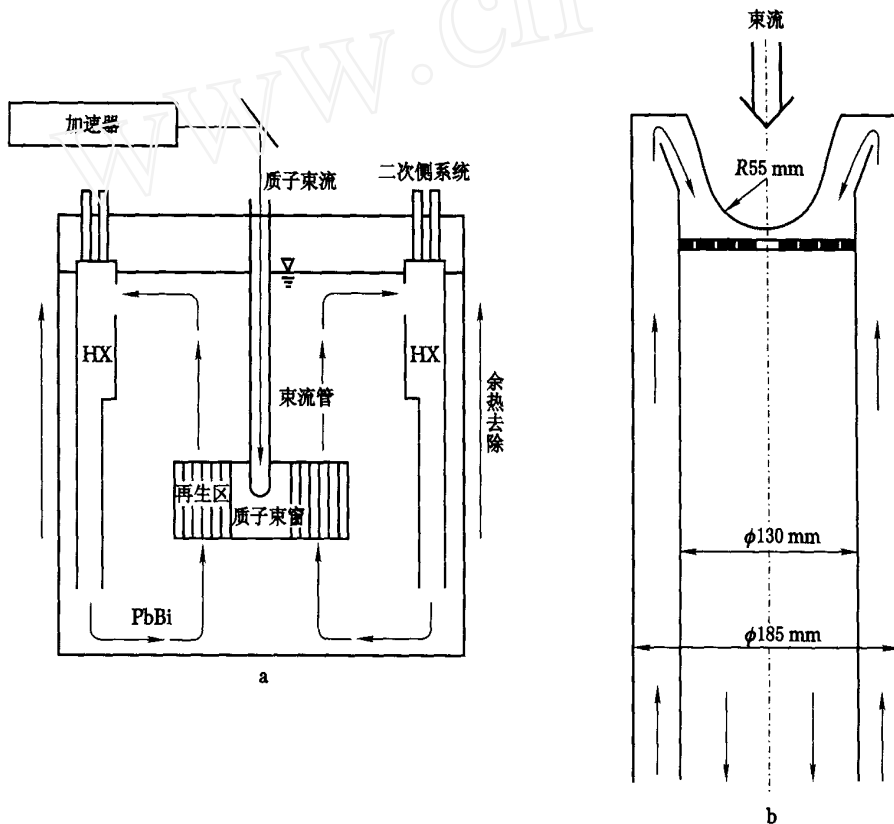


图 1 加速器驱动次临界系统(ADS) (a) 及其散裂中子靶(b)

Fig. 1 Sketch of conceptual ADS(a) and spallation target (b)

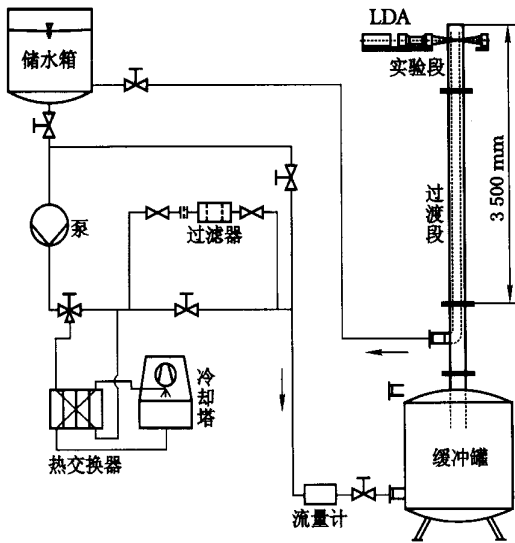


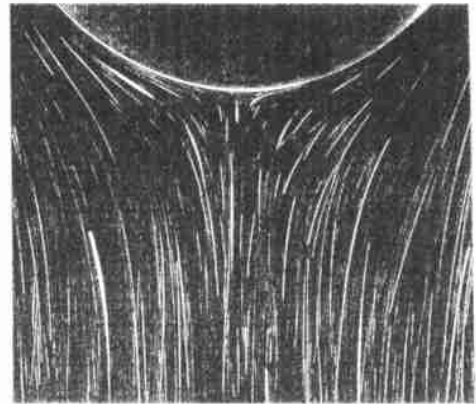
图2 实验回路示意图

Fig.2 Schematic diagram of the test loop

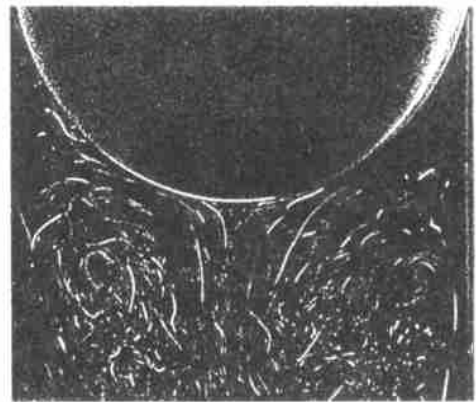
采用片激光法显示实验段质子束窗附近的流动情况。示踪粒子为直径 0.5 mm 的聚苯乙烯球状颗粒,其密度与水相同。片激光从侧面竖直方向进入实验段,照亮示踪粒子。示踪粒子随连续介质水同速运动,其运动轨迹反映着水的流动情况。采用 KAPPA CCD (Charge-coupled Device) 数码摄像系统对流场进行实时拍摄,图像显示分辨率可达768 ×576。

3 观测结果与分析

图 3a、b 分别显示流体向上和向下流过实验段中央流道(靶区)时质子束窗附近的流型。由图可见:它们分别与典型的圆柱体二维对称绕流的圆柱体前部流型和后部流型基本一致。对于前者,流动的滞止点出现在质子束窗的前缘点;后者的流型比前者复杂得多。在本实验条件下,流体在进入靶区前发生边界层分离,在质子束窗下方形成两对称的旋涡。两旋涡在靶区中央重叠,形成一股向上的较强回流。这股回流沿质子束窗表面向两侧流动并在来流的冲击下顺流返回。由于旋涡的存在,质子束窗下方的流体停滞不前,这将削弱质子束窗的冷却效果。实验观察还表明:不同流量下的流型无明显差别。



a



b

图3 质子束窗附近流型

Fig.3 Flow patterns around the target beam window

a——流体向上流动;b——流体向下流动

4 结论

采用片激光法对 ADS 模拟靶件质子束窗附近的流动情况进行观测,获得了高清晰的靶区流型图,可供靶件设计和靶区流场的数值模拟参考。

参考文献:

- [1] Gudowski W. Accelerator driven Systems ——Survey of the Research Programs in the World [A]. Nuclear Methods for Transmutation of Nuclear Waste [C]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1996. 3~25.
- [2] Yefimov E. The Main Results of Feasibility Study of Liquid Metal Targets [R]. Russia: Institute of Physics and Power Engineering, 1998.