

Lead-Bismuth Flow Vortex Shedding Research

Yunbo Li, Tao Zhou*, Ziwei Su, Xu Yang

Institute of Nuclear Thermal-Hydraulic Safety and Standardization, North China Electric Power University, Beijing
Email: 676850083@qq.com

Received: Sep. 9th, 2013; revised: Sep. 24th, 2013; accepted: Sep. 27th, 2013

Copyright © 2014 Yunbo Li et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Yunbo Li et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: In the pipeline, if the phenomenon of the vortex shedding occurs, it will cause the heat transfer tube damage and rupture, and cause a great impact on the whole circuit safety. Based on the parameters of Sweden TALL loop and the defined type of the vortex shedding frequency: $f_v = S_t v / d$, to calculate the Pb-Bi loop heat exchanger pipeline, we can get the relationship between the vortex shedding frequency and the flow velocity, pipe diameter, Castro HA. The results show that: 1) When the pipe diameter is larger, the vortex shedding frequency is smaller. 2) As the flow velocity is increasing, the probability of occurrence of the vortex shedding frequency is greater. 3) The larger the Castro HA number is, the bigger the probability of occurrence of the vortex shedding frequency is.

Keywords: Lead Bismuth; Vortex Shedding; Castro HA Number

铅铋流动漩涡脱落研究

李云博, 周涛*, 苏子威, 杨旭

华北电力大学核热工安全与标准化研究所, 北京
Email: 676850083@qq.com

收稿日期: 2013年9月9日; 修回日期: 2013年9月24日; 录用日期: 2013年9月27日

摘要: 管路中, 如果发生漩涡脱落现象, 将会造成传热管损坏、破裂, 对整个回路安全性造成不良影响。基于瑞典 TALL 回路的各项参数, 以及漩涡脱落频率的定义式: $f_v = S_t v / d$, 对铅铋回路换热器管路进行计算, 得到了漩涡脱落频率与来流速度、管道直径、斯特罗哈数之间的关系。计算结果表明: 1) 管道直径越大, 发生漩涡脱落的频率越小。2) 来流速度越大, 发生漩涡脱落频率的概率越大。3) 斯特罗哈数越大, 发生漩涡脱落频率的概率越大。

关键词: 铅铋; 漩涡脱落; 斯特罗哈数

1. 引言

换热器管中的铅铋流体的漩涡脱落极易造成管子的磨损或破裂。据国外有关报告, 约 40% 核电站存在传热管破损事故^[1]。对于铅铋回路, 国际上进行实验研究的国家还不多, 瑞典、韩国、印度、意大利、美国^[2-4]等不多的几个国家拥有比较完整的实验台架

*通讯作者。

并进行了实验研究, 研究内容主要集中在材料、流动换热。在中国, 艾辛格、张继业等对于环形管道铅铋的湍流传热有研究。华北电力大学核热工安全与标准化研究所周涛、刘梦影、苏子威^[5-10]对铅铋的物性和换热进行了研究。由于铅铋流体密度较大, 接近于水的 10 倍, 各方面物性都与水有着巨大差别, 如果发生漩涡现象, 将造成传热管道的破损、泄漏, 严重影

响整个循环回路的安全性。因此对漩涡脱落进行研究和计算，对于铅铋回路换热器的设计和整个反应堆的安全性是十分必要的。

2. 研究对象

2.1. TALL 回路

建在瑞典皇家理工学院 KTH 的 TALL 回路^[4]，如图 1 所示，是一个中等尺寸的实验设备。它的目的是来测试铅铋冷却反应堆的稳态和瞬态热工水力特性的。根本目的是为了支持欧洲嬗变示范堆 ETD 用铅铋冷却加速器驱动的次临界系统 XADS。

从图 1 看到，主回路是封闭的 LBE 回路，包括一个泵，一个流量计，多个加热器、管路、换热器和大容器。二回路的循环回路包括：油泵、换热器、沉淀池、流量计、管道、阀门、温度和压力传感器。

2.2. 回路相关参数

如表 1。

2.3. 漩涡脱落定义

当铅铋流体横掠换热管时，雷诺数达到一定程度，管子背面两侧将产生周期性漩涡尾流，管束因漩涡脱

Table 1. TALL design parameters
表 1. TALL 设计参数

主回路管道：外径 33.4 mm， 内径 27.8 mm	二回路管道：外径 26.7 mm， 内径 23.3 mm
主回路管道材料：AISI316 不锈钢	二回路管道材料：碳素钢
主回路工质：LBE	二回路工质：甘油
主回路最大流量：15 L/min	二回路最大流量：260 L/min
主回路工质：LBE	二回路工质：甘油
主回路预热管道：绳式加热器	二回路预热管道：带式加热器
设备总高：6.8 m	设备总电功率：55 kW
LBE 在热交换器管中 最大流速：3 m/s	LBE 的体积最大流量：2.5 m ³ /h
换热器顶端压力：0.1 MPa	换热器底端压力：0.8 MPa
最大自然对流速率：50 cm/s	LBE 的最高温度：500℃
换热器雷诺数数量级：10 ³ ~10 ⁵	管道固有频率范围：20 Hz~200 Hz

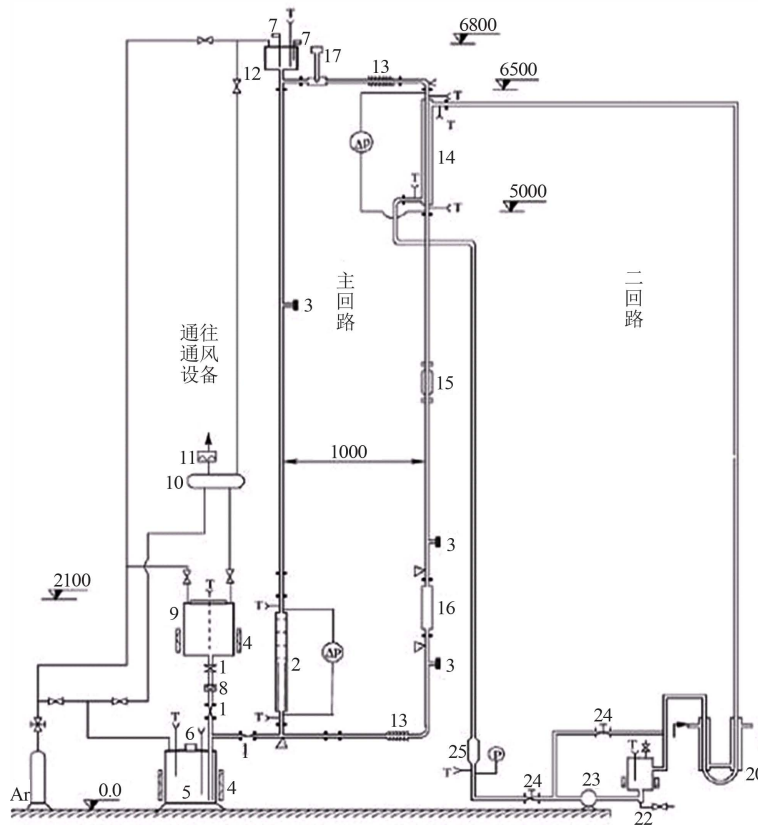


Figure 1. Schematic diagram of the TALL loop
图 1. TALL 回路示意图

落引起的振幅随流体掠过管束流速的不同而不同, 流速较低时, 振幅接近线性增大, 随后则呈现迅速上升的特性, 当达到漩涡脱落流速 v 时, 漩涡脱落频率与换热管固有频率吻合, 换热管振动强烈, 振幅达到第一个高峰, 之后随着流速的继续增大, 这种共振现象就会消失。

3. 计算模型

3.1. 漩涡脱落频率方程

$$f_v = S_l v / d \quad (1)$$

其中: f_v : 漩涡脱落频率, Hz; S_l : 斯特罗哈数(strousal); v : 来流速度, m/s; d : 管道直径, m。

3.2. 雷诺数方程

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (2)$$

其中: Re : 雷诺数; ρ : 流体密度, kg/m^3 ; v : 来流速度, m/s; d : 管道直径, m; η : 密度粘度, $\text{pa}\cdot\text{s}$ 。

3.3. 铅铋密度方程

周涛^[6]所归纳如下铅铋的密度方程。

$$\rho_{LBE} = 11096 - 1.3236T \quad (3)$$

其中: ρ_{LBE} : 铅铋密度, kg/m^3 ; T : 铅铋温度, K。

3.4. 斯特罗哈数取值

斯特罗哈数是和流场的不定常性有关的无量纲数, 根据吴科学所著涡街流量计工作原理^[11], 当雷诺数的数量级在 $10^2 \sim 10^5$ 之间的, 斯特罗哈数范围取经验值 0.14~0.27 之间。

4. 计算结果及分析

4.1. 漩涡脱落频率与管道直径关系

在公式(1)中, 取 v 与 S_l 分别为 3 m/s、0.25, 2 m/s、0.2, 1 m/s, 0.15, 管道直径变化范围为 35 mm~45 mm, 漩涡脱落频率与管道直径关系如图 2 所示。

由图 2 中的三条曲线可知, 漩涡脱落频率与管道直径的关系是互成反比关系的一条平滑的曲线。管道直径越大, 漩涡脱落频率越小。因为随着管道直径的增加, 同等速度下水的质量流量增大, 单位质量的水

与管间的应力变小, 扰动减小, 产生涡旋的概率越来越低。如图 2 中所示, 当管径为 35 mm 时, 三组数据中的漩涡脱落频率分别为 21.4 Hz、11.4 Hz、4.2 Hz, 并随着直径的增大越来越小, 直到管径变为 45 mm 时, 漩涡脱落频率分别为 16.6 Hz、8.8 Hz、3.3 Hz, 与表 1 中所示管道的固有频率范围 20 Hz~200 Hz 相差越来越远, 发生漩涡脱落的概率变小。

4.2. 漩涡脱落频率与来流速度的关系

取 d 与 S_l 分别为三组数值 45 mm、0.25, 35 mm、0.2, 30 mm、0.15, v 变化范围是 0.5 m/s~3.5 m/s, 漩涡脱落频率与来流速度的关系如图 3 所示。

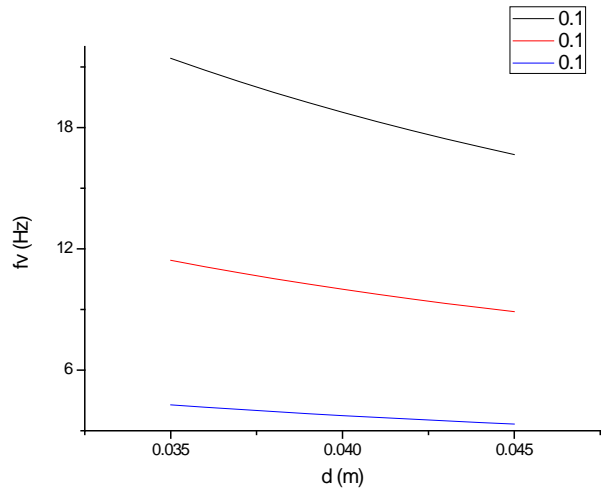


Figure 2. The relationship between vortex shedding frequency and the pipe diameter

图 2. 漩涡脱落频率与管道直径关系

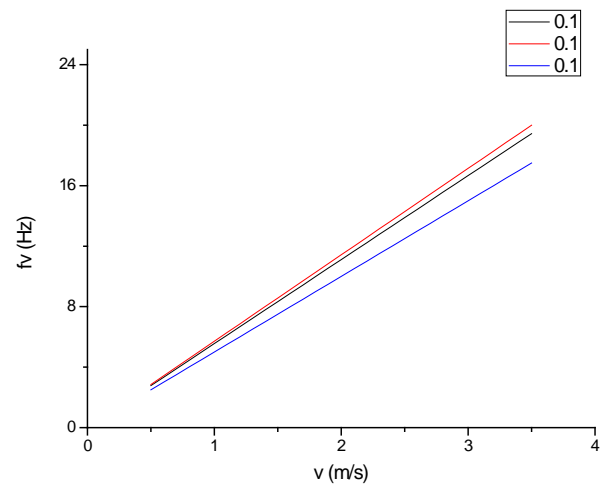


Figure 3. The relationship between the vortex shedding frequency and the velocity

图 3. 漩涡脱落频率与来流速度的关系

由图3可知,漩涡脱落频率和来流速度之间的关系是一条有斜率的直线。管内来流速度越大,漩涡脱落频率越大。因为随着速度的增大,管道与铅铋流体之间的各项应力增大,更容易产生漩涡。当流速为0.5 m/s时,漩涡脱落频率分别仅有2.7 Hz、2.8 Hz、2.5 Hz,当来流速度上升到3.5 m/s时,漩涡脱落频率增加为19.4 Hz、20 Hz、17.5 Hz,与表1中所示的管子固有频率值20 Hz到200 Hz越接近,发生漩涡脱落的概率变大。

4.3. 漩涡脱落频率与斯特罗哈数的关系

由公式(2)(3),以及表1数据,计算铅铋流体雷诺数^[6]在 3.6×10^5 左右,斯特罗哈数范围取经验值0.14~0.27之间。取 d 为40 mm, v 为3 m/s,漩涡脱落频率与斯特罗哈数之间的关系如图4所示。

由图4可知,漩涡脱落频率与斯特罗哈数的函数曲线呈直线关系。斯特罗哈数是由物体形状阻力系数决定的参数,主要由管件的形状尺寸决定,表示流体在管内受到的各向阻力因素,斯特罗哈数越大,铅铋流体在管内受到的各向阻力越大,越容易产生漩涡,漩涡脱落频率越大,在铅铋回路中,就越容易发生漩涡脱落导致的流致振动现象。

5. 结论

根据以上的据算结果,我们可以得出以下三点结论:

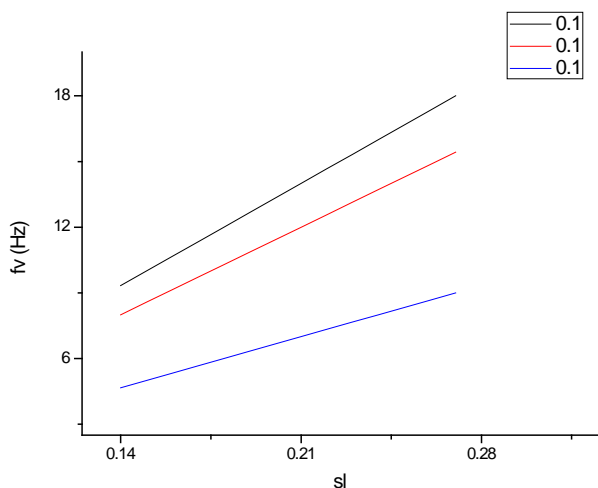


Figure 4. Relationship between the vortex shedding frequency and the number of Castro

图4. 漩涡脱落频率与斯特罗哈数的关系

1) 铅铋回路换热器中,随着管道直径越大,漩涡脱落频率越小,与管子的固有频率相差越远,发生流致振动现象的概率越小,对管道可能造成损害的机率也小。

2) 铅铋回路换热器中,来流速度越大,漩涡脱落频率越大,与管子的固有频率越相近,发生流致振动现象的概率越大,对管道可能造成损害的机率也越大。

3) 铅铋回路换热器中,斯特罗哈数越大,漩涡脱落频率越大,与管子的固有频率越相近,发生流致振动现象的概率越大,对管道可能造成损害的机率也越大。

4) 通过计算,可知设计管道时,采用相对较大直径,降低来流速度,控制雷诺数以减小斯特罗哈数,都可以防止漩涡脱落现象的发生,从而保护管道免受流致振动的侵害。

项目基金

中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA03040000)教育部博士点基金(No.200800791005)。

参考文献 (References)

- [1] 宋立秋 (2011) 核电及其蒸发器传热管用材料的发展. *攀钢技术*, **3**, 1-4.
- [2] 艾辛格 (1993) 管式换热器中流致振动的预防与消除. *核动力工程*, **6**, 1-8.
- [3] Ma, W.M. and Karbojian, A. (2009) Thermal-hydraulic performance of heavy liquid metal in straight-tube and U-tube heat exchanger. *Nuclear Engineering and Design*, **239**, 1323-1330.
- [4] Korkischko, I. and Meneghini, J.R. (2012) Suppression of vortex-induced vibration using moving surface boundary-layer control. *Journal of Fluids and Structures*, **2**, 259-270.
- [5] 张继业, 马建忠 (2008) 管束流致振动有限元法. *核动力工程*, **3**, 271-274.
- [6] 周涛 (2013) 铅铋回路中间换热器设计报告. 华北电力大学核热工安全与标准化研究所, ADS 先导计划课题组, 华北电力大学, 北京, 1-46.
- [7] 周涛 (2013) ADS 试验二回路调研报告. 华北电力大学核热工安全与标准化研究所, 北京, 1-16.
- [8] 周涛 (2013) 热物性及传热方程调研报告. 华北电力大学核热工安全与标准化研究所, 北京, 6-17.
- [9] 刘梦影 (2013) 铅铋合金自然循环流动传热研究. 硕士论文, 华北电力大学, 北京.
- [10] 苏子威 (2013) ADS 装置液态铅铋热分层比例分析研究. 华北电力大学核热工安全与标准化研究所, 北京, 6-17.
- [11] 吴科学 (2001) 涡街流量计的工作原理与维修. *仪表技术*, **3**, 52-53.