

铅铋合金自然循环稳定流动的析因分析

霍启军^{1,2} 周涛^{1,2} 李云博^{1,2} 李精精^{1,2}

1 (华北电力大学 核热工安全与标准化研究所 北京 102206)

2 (北京市非能动技术重点实验室 北京 102206)

摘要 液态铅铋合金(Lead Bismuth Eutectic, LBE)自然循环流动的研究,有助于解决加速器驱动的次临界反应堆(Accelerator Driven Sub-critical systems, ADS)中冷却剂的流动稳定性及传热问题。运用析因分析方法,分析液态铅铋合金自然循环流动的不同影响因素及其因素间交互作用。结果显示,在对流速的影响中,管径大小影响所占的百分比贡献率最大,其次是温差的影响,之后是温差和管径交互的影响,最后是高度差和管径的交互影响。其他因素及其他因素间交互作用对流速的影响可以忽略不计。

关键词 液态铅铋合金, 自然循环, 析因分析

中图分类号 TL334

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.030604

长寿命核废料的处理处置难题将成为我国核电事业能否持续发展不可缺少的一环。考虑到能源使用的可持续性、防止核扩散等因素,国际上已经对嬗变技术进行了大量的基础研究。加速器驱动的次临界反应堆(Accelerator Driven Sub-critical systems, ADS)是最有前景的嬗变技术之一^[1],作为堆内靶件和冷却剂的铅铋流体受到了广泛的关注。目前,一些学者采用计算机建模,然后数值计算的方法分析铅铋合金自然循环流动特性,并将分析的参数无量纲化^[2-4]。无量纲化的分析方法可以将一种流体的流动稳定性测量数据应用于另一种流体。这种分析方法可以在很大程度上减小运行成本,但是这种模拟的可靠性还有待验证。在对铅铋合金自然循环流动^[5]的影响分析中都是采用单一因素分析法。单一因素分析法是通过改变一个因素,固定其他因素的方法来研究因素与响应之间的关系。此方法只能分析各因素单独作用对实验结果的影响,却无法研究因素之间的关系。但是在实际的实验中,各影响因素之间是相互联系、相互制约的,一个因素发生改变往往会导致其他因素也发生相应的改变。因此,在实际研究中不应忽视这种交互作用的影响。

1 研究方法

析因是一种实验设计的方法,利用该方法可以同时观察多个因素的效应,提高实验效率;允许一个因素在其他各因素的几个水平上来估计其效应,

所得的结论在实验范围内有效。当分析几个因素的作用时,析因设计是一种非常理想的方法,不仅可以检验各因素各水平之间的差异,也可以检验因素间的交互作用。在含有 k 个因子,每个因子有两个水平的析因设计中,统计模型中包含 k 个主效应, C_k^2 个二因子交互作用, C_k^3 个三因子交互作用,……,以及一个 k 因子交互作用。全模型的效应^[5]含有 2^k-1 个。

确定效应的对照可以用展开式(1)右边的方法:

$$(\text{Contrast})_{AB\dots K} = (a \pm 1)(b \pm 1)\dots(k \pm 1) \quad (1)$$

式中, $(\text{Contrast})_{AB\dots K}$ 表示效应的对照; a 、 b 、 k 表示各个因素。

在展开式(1)中,按初等代数方法计算,而在最后的表示中,用[1]代替“1”,表示所有因子取其低水平。小括号中的符号的选取方法是:当因子包含在效应中时,取负号;不在时,取正号。

一旦算出效应的对照,就可分别计算其估计效应和其平方和:

$$AB\dots K = \frac{2}{2^k n} (\text{Contrast}_{AB\dots K}) \quad (2)$$

$$SS_{AB\dots K} = \frac{1}{2^k n} (\text{Contrast}_{AB\dots K})^2 \quad (3)$$

式中, $AB\dots K$ 表示其估计效应; $SS_{AB\dots K}$ 表示其平方和; k 表示析因设计中因素的个数; n 表示试验的重复次数,该试验为单次重复试验,因此 $n=1$ 。

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA03040000)资助

第一作者:霍启军,男,1987年出生,2010年毕业于华北电力大学,研究领域为核反应堆热工水力

通讯作者:周涛, E-mail: zhoutao@ncepu.edu.cn

收稿日期:2014-10-11, 修回日期:2014-11-14

将析因分析方法应用于铅铋合金自然循环流动稳定特性的研究, 选取三因子交互计算模型, 来分析不同因素及因素间的交互作用对铅铋合金自然循环流动传热特性的影响。

2 问题描述

华北电力大学核热工安全与水力研究所 ADS 研究团队对铅铋合金自然循环流动特性进行了研究。通过研究, 其团队成员刘梦影等^[6-8]得出了影响铅铋合金自然循环流动特性的数据。而铅铋的流速大小表征着自然循环的强烈程度, 对其传热能力影响也很大。自然循环越强烈, 其换热能力越强。根据 ADS 研究团队的研究结果, 选取的典型数据如表 1 所示。

表 1 计算数据
Table 1 Calculated data.

温差 Temperature difference / °C	高度差 Height difference / m	管径 Diameter / mm	流速 Velocity / m·s ⁻¹
100	2.5	50	1.65
100	2.5	100	8.39
100	5.5	50	2.51
100	5.5	100	12.65
30	5.5	50	1.21
30	5.5	100	6.26
30	2.5	50	0.8
30	2.5	100	4.14

由表 1, 影响因素分别选取冷热段温差、高度差等关键因素, 相应的结果选取流速。选取团队研究结果中的典型数据, 运用析因分析方法对铅铋合金自然循环流动特性^[9]进行分析。

3 计算结果及分析

3.1 单因素作用影响

将表 1 中所得数据代入式(1)–(3), 可得出各因素单独作用的估计效应及平方和, 进一步可以计算出其百分比贡献率。为了分析的方便, 将温差影响、高度差影响、管径影响分别用字母 A、B、C 表示。表 2 所示的是各因素单独作用对流速的影响。

由表 2, 在各因素单独作用对流速的影响中, 管径大小影响所占的百分比贡献率最大, 约 65.94%; 其次是温差的影响, 其百分比贡献率占 16.89%; 之后是高度差的影响, 其百分比贡献率占 6.04%。

表 2 各因素单独作用对流速的影响
Table 2 Impact of each factor alone on velocity.

模型项 Model	效应估计 Effect estimation	平方和 Quadratic sum	百分比贡献率 Percentage of contribution rate
A	3.197 5	20.448 01	0.168 916
B	1.912 5	7.315 313	0.060 430
C	6.317 5	79.821 61	0.659 386

3.2 各因素交互作用影响

将表 1 中数据代入式(1)–(3), 可以计算出各因素交互作用的估计效应和平方和以及百分比贡献率。温差与高度差的交互作用为 AB, 温差与管径的交互作用为 AC, 高度差与管径的交互作用为 BC, 三者总的交互作用为 ABC。表 3 所示的是各因素交互作用对流速的影响。

表 3 各因素交互作用对流速的影响
Table 3 Impact of the interaction of various factors on velocity.

模型项 Model	效应估计 Effect estimation	平方和 Quadratic sum	百分比贡献率 Percentage of contribution rate
AB	0.647 5	0.838 513	0.006 927
AC	2.122 5	9.010 013	0.074 429
BC	1.277 5	3.264 013	0.026 963
ABC	0.422 5	0.357 013	0.002 949

由表 3, 在各因素交互作用对流速的影响中, 温差与管径的交互作用影响所占的百分比贡献率最大, 约 7.44%; 其次是高度差与管径的交互作用影响, 其百分比贡献率占 2.69%; 之后是温差与高度差的交互作用影响, 其百分比贡献率为 0.69%; 最后是三者的总交互作用影响, 其百分比贡献率占 0.29%。可以看出, 温差与高度差交互作用和三者共同交互作用对流速的影响很小, 可以忽略不计。

3.3 效应正态概率

通过表 2 和表 3 的计算结果, 可以得出各影响因素的估计效应正态概率关系。效应估计的正态概率分布如图 1 所示。

在正态概率分布图中(图 1), 概率越大意味着该因素的影响越大。在对流速的影响中, 单因素影响主要由管径和温差决定, 高度差的影响很小; 在交互因素的影响中, 温差和管径的交互影响起决定作用, 其他交互作用的影响较小。通过对比各参数对铅铋自然循环稳定流动的影响可知, 在所选的参

数范围内，流速受管径的影响较大，且其影响效应正相关。即管径越大，流速越大。温差与流速的影响正相关，随着温差的增加，循环的提升压力增大，流速增加。温差与管径共同作用时，其影响效应正相关。温差增大时，自然循环冷热流体密度差增加，冷热段的压差增大，自然循环能力增强，导致流速增加。因此管径和温差的影响与铅铋的自然循环流量都呈现正相关性。其他因素对循环提升压力的作用很小，可以忽略。

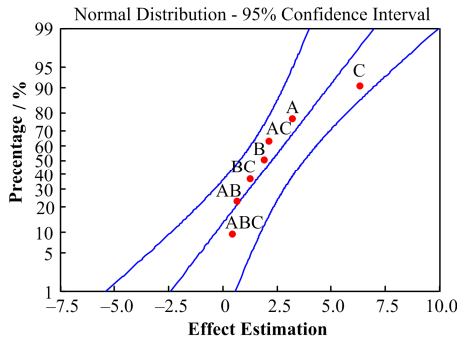


图1 效应估计的正态概率图

Fig.1 Normal probability figure of effect estimate.

4 结语

利用析因分析方法，对铅铋自然循环流速影响因素的研究数据进行了分析，得出了不同因素对铅铋自然循环流动的影响结果。

析因分析方法可以很好地研究因素之间的交互作用。利用析因分析方法对铅铋合金自然循环流动特性进行相关研究，能更好地解决加速器驱动的次临界反应堆中冷却剂的流动及传热相关问题。对建设铅铋自然循环回路、促进 ADS 系统进一步完善有重要意义。

参考文献

- 左娟莉, 田文喜, 秋穗正, 等. 铅铋合金冷却反应堆内气泡提升泵提升自然循环能力的理论研究[J]. 原子能科学技术, 2013, **47**(7): 1155-1161
ZUO Juanli, TIAN Wenxi, QIU Suizheng, *et al.* Research on enhancement of natural circulation capability in lead-bismuth alloy cooled reactor by using gas-lift pump[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, **47**(7): 1155-1161
- Montgomery D C. Design and analysis of experiments[M]. John Wiley & Sons Inc, 2008
- Debrah S K, Ambrosini W, Chen Y Z. Discussion on the stability of natural circulation loops with supercritical pressure fluids[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, **4**: 47-57
- Chatoorgoon V, Voodi A, Fraser D. The stability boundary for supercritical flow in natural convection loops Part I: H₂O studies[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, **235**: 2570-2580
- Walter A. Discussion on the stability of heated channels with different fluids at supercritical pressures[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, **239**: 2952-2963
- 刘梦影. 铅铋合金自然循环流动传热研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013
LIU Mengying. Research on lead bismuth eutectic natural circulation flow and heat transfer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013
- 苏子威, 周涛, 刘梦影, 等. 液态铅铋合金热物性研究[J]. 核技术, 2013, **36**(9): 090205
SU Ziwei, ZHOU Tao, LIU Mengying, *et al.* Thermophysical properties of liquid lead bismuth eutectic[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(9): 090205
- 邹文重, 周涛, 苏子威, 等. 注气对铅铋流动换热参数影响的数值研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2013, **33**(2): 187-192
ZOU Wenzhong, ZHOU Tao, SU Ziwei, *et al.* Numerical simulation of the impact gas injection on the lead-bismuth liquid flow and heat transfer parameters[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2013, **33**(2): 187-192
- 王焕光. 加速器驱动次临界系统(ADS)堆芯冷却系统换热优化[D]. 中国科学院大学(工程热物理研究所), 2013
WANG Huanguang. Heat transfer optimization of reactor core cooling system of accelerator driven subcritical system (ADS)[D]. University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2013

Steady flow research of lead bismuth eutectic under natural circulation based on factorial analysis

HUO Qijun^{1,2} ZHOU Tao^{1,2} LI Yunbo^{1,2} LI Jingjing^{1,2}

1(Institute of Nuclear Thermal-Hydraulic Safety and Standardization, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

2(Key Laboratory of Passive Technology of Beijing, Beijing 102206, China)

Abstract Background: The study of natural circulation of Lead Bismuth Eutectic (LBE) has great significance for the Accelerator Driven Sub-critical systems (ADS). **Purpose:** This study aims to analyze the factors and the interaction between different factors on natural circulation flow of LBE. **Methods:** Based on the previous experimental results obtained by ADS team, the factorial analysis method is applied to study the steady flow of lead bismuth eutectic under natural circulation using typical data. **Results:** The pipe diameter size accounts for about 65.94% of the total influence on the steady state flow whilst the temperature difference accounts for 16.89%, the temperature difference and tube diameter interaction accounts for 7.44%, the height difference and tube diameter account for 2.7%. **Conclusion:** The pipe diameter size is the most important influence factor of the steady flow of lead bismuth eutectic, much larger than all others such as temperature difference, interaction between temperature difference, tube diameter, and the interaction between height difference and tube diameter.

Key words Lead Bismuth Eutectic (LBE), Natural circulation, Factorial analysis

CLC TL334