

一九七九年核反应堆热工流体会议资料汇编

核反应堆热工

计算及实验

原子能出版社

内 容 简 介

在一九七九年五月召开的反应堆热工流体会议上,首次发表了我国反应堆热工设计和实验工作的研究成果。本书就是这次会议上发表的论文的汇编。

本书分计算和实验两大部分。设计部分包括稳态计算、热管因子计算、子通道分析以及某些事故工况的动态计算等;实验部分包括临界热通量、传热系数、堆内温度测定、单相和两相压降、流速分布、空泡份额测定、流态模拟、活性区流量分配等。大多数工作探讨的是水冷堆内发生的问题,也有部分论文研究了气冷、钠冷等反应堆内的热工水力过程。

本书可供反应堆工程部门的科技人员和大专院校有关专业的师生参考。对于热能动力、化工等专业的科技人员,本书也有一定的参考价值。

核反应堆热工计算及实验

(1979年核反应堆热工流体会议资料汇编)

原子能出版社出版

(北京 2108信箱)

国防科委印刷厂印刷

(北京308信箱)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 $1/16$ ·印张34 $1/4$ ·字数 800 千字

1981年5月第一版·1981年5月第一次印刷

印数001—860·统一书号: 15175·260

定价: 4.85元

编 者 的 话

一九七九年五月十日至十七日，在湖南长沙召开了反应堆热工流体会议。会上报告了反应堆热工流体方面的成果，交流了经验，讨论了反应堆热工流体学科规划，成立了工程热物理学会传热传质分会下属的反应堆热工流体专业（筹备）组。

参加这次会议的有全国各地的科研设计部门、高等院校和生产厂等40多个单位，160多名代表。会上收到学术论文和报告166篇，宣读了94篇，并进行了热烈讨论。

王补宣、陈学俊、冯俊凯、杨世铭、程尚模等专家自始至终参加了会议，并在会上作了指导性的讲话。

为进行更为广泛的交流，会议决定将有关报告编成文集出版。全文刊登的报告是根据各单位和大会三个分组的推荐，由会议秘书组确定的。其余论文则以摘要形式刊登。

本书内容大致按反应堆热工设计计算、热工实验研究和流体流动实验研究的次序安排。各篇文章中所用的术语、符号、单位等全书未求统一。

本文集编辑小组由陈叔平、马昌文、黄士鉴、张伯义、章靖武、戴安国、姜樾、柴芙蓉等组成。限于水平，在编辑工作中一定会有不少错误，敬希指正。

一九七九年八月

目 录

中国工程热物理学会副理事长王补宣教授的讲话	(1)
西安交通大学陈学俊教授的报告——汽液两相流与沸腾换热的一些基本问题	(4)
清华大学冯俊凯教授的报告——西德在核反应堆热物理方面的一些研究工作	(15)
活性区热工水力子通道分析程序	袁乃驹 柴长岭 (25)
HAMBO子通道分析程序计算模型及处理方法的若干特点 (摘要)	熊晓汉 (34)
重水堆束棒元件精细温度计算 (摘要)	田树全 高明本 (35)
多层套筒带肋燃料元件热点温度计算	俞尔俊 张应超 傅丽清 姜之藤 (35)
赵国俊 武春华	(35)
高温气冷球床堆热工水力计算及程序	高祖英 张瑞茵 (42)
球形燃料元件热分析	马昌文 赵翊民 张阿玲 马绍川 (51)
元件与带肋工艺管同心时温度场的计算 (摘要)	杭力群 (60)
温度场有限元素算法	孔祥谦 (60)
三维导热计算及程序	高祖英 白开龙 (67)
用实测不利因子计算反应堆最大允许功率 (摘要)	沈振新 (76)
反应堆最大允许功率的监督 (摘要)	吴英华 罗再玉 (77)
高通量反应堆运行定值的计算及分析 (摘要)	阎广君 (77)
一个形状不很规则的柱体内热传导方程的近似解 (摘要)	彭国勋 李开源 (78)
双球高温气冷堆堆芯漏流分析和程序 (摘要)	马远乐 高祖英 (78)
用电阻网络模拟方法解反应堆传热问题	花家宏 (79)
元件温度场电阻网络模拟 (摘要)	花家宏 郑福彰 刘金火 李怀萱 程 萍 (88)
承重结构的轴向温差 (摘要)	林启迪 (88)
堆内大型金属构件——多孔大板二维稳态温度场的电阻网络	
模拟计算 (摘要)	花家宏 熊本和 (89)
带肋多层套管元件的热工性能 (摘要)	王家丰 (89)
活性区热工设计的可靠性	杨 彬 (90)
热管和热点因子的统计分析	张志达 (98)
在反应堆设计中的热管和热点因子	王家丰 (106)
燃料元件涂层缺陷引起的温升	林启迪 (112)
压水堆核电站中反应堆载热剂系统的容积控制	陈效军 (120)
压水堆装置的自然循环特性及其计算 (摘要)	颜 俊 (129)
压水堆中的水动力模型 (摘要)	沈壬辉 (130)
石墨水冷反应堆动态特性计算分析	王奇卓 王世华 包钰年 (130)
压水堆电站简化蒸汽发生器热工动态程序的分析	戴安国 (139)

卧式蒸汽发生器动态分析(摘要)	包箴年 (150)
管状元件瞬态热工分析的数学模型	章靖武 (150)
压水堆失水事故分析计算模型	陈耀元 田大起 (157)
压水堆失水事故分析程序	徐受律 (163)
失水事故(摘要)	王荣忠 (172)
压水堆电站停堆冷却过程的热交换计算(摘要)	沈壬辉 (173)
压水堆电站全部主泵断电动态流量计算方法分析(摘要)	赵嘉煜 张会敏 (173)
压水堆各环路流量的确定及主泵负载力矩与转速间的关系	陈鉴墅 顾全生 (174)
主泵断电后反应堆一回路的流量陡降(摘要)	王奇卓 (182)
反应堆多回路系统流量暂态计算分析(摘要)	李经纬 (182)
蒸汽稳压器动态过程的数学模型及其模拟研究	林 杰 (183)
控制棒失去冷却时的温度计算(摘要)	彭国勋 李开源 尹春芳 (189)
球床高温气冷堆反应性事故分析及程序(摘要)	高祖英 胡 恺 (190)
核电站升降功率速率限制因素分析(摘要)	尹春芳 (190)
反应堆暂态计算和试验结果的比较	柴长岭 裘泽椿 (191)
压水反应堆动态特性实验研究	魏永仁 柴长岭 李经纬 (198)
反应堆一回路系统的惯性流量测量	王秀清 史道兴 张年绪 王培信 张兆丰 (213)
高通量反应堆断电事故后瞬态流量的计算及试验	胡必利 金德圭 王金软 (221)
压水堆无盒燃料组件水力特性试验研究	
.....郭春华 朱炳艺 徐银龙 丁锡英 周宇峰 姚同生 徐蓓芬	(231)
压水堆主回路部件的阻力特性(摘要)	刘汉勋 (241)
石墨水冷堆工艺管系统水力特性试验	
.....郑福彰 凌忠佩 潘佩霞 任爱华 张龙红 张志达 钱道元 冯桂芝	(241)
研究性重水反应堆工艺管水力特性试验(摘要)	李素义 魏连海 范永革 (252)
重水反应堆燃料元件工艺管道水力特性研究	
.....马玉兰 梁振原 郑福彰 张秀金 刘晓彬 吴亚萍	(253)
七根带肋束棒组件的水力特性试验	郑福彰 马玉兰 梁振原 包箴年 徐海英等 (260)
重水反应堆控制棒的水力特性试验(摘要)	高明本 张秀金 吴亚萍 刘晓彬 (265)
游泳池式反应堆双喷射器冷却回路水力特性试验	游泳池式反应堆调试组 (266)
用图解法确定压水堆电站主系统的水力性能(摘要)	徐植前 (274)
控制棒水力缓冲	苏耀祖 季德官 汪金根 张金品 (275)
控制棒导向管内漏流量的试验和计算方法(摘要)	田吉安 (279)
反应堆等温水力模拟试验研究的若干问题	
.....宗桂芳 张英俊 李 波 杨惠敏 高树范 施华明 张志毅	(280)
研究性重水反应堆活性区流量分配实验	王继东 曾凡昌 姚日琪 李治宇 钱道元 (287)
压力壳式反应堆活性区流量分布	董柏年 (296)
电站压水堆的流动模型(摘要)	张兆丰 (306)
压水堆的简化水力模型的原理论证(摘要)	王幼纯 (306)
压力管型重水堆慢化剂流态水模试验	杨怡元 李炎清 哈焕文 刘长庚 董兴林 (307)

压力容器式重水反应堆流态小模拟试验 (摘要)	杨怡元 杨菊仙 (311)
反应堆主热交换器流态实测报告	刘汉勋 施华明 王培信 史道兴 (311)
列管式热交换器流态和水力试验	王 皎 (316)
在充分紊流流动条件下有限棒束流道的速度分布实验和计算	曾凡昌 金德圭 周海云 (323)
钠冷快堆燃料棒偏心时在湍流中的速度和温度分布计算(摘要)	胡颂德 (331)
国外反应堆热工实验研究发展概况 (摘要)	孙玉发 (332)
高压水在十根和三十根棒束元件中流动沸腾时的临界热通量	李忠朋 叶树荣 李永嘉 宋贤惠 罗共信 郭忠川等 (333)
三十根棒束临界热通量的进一步研究	叶树荣 郭忠川 宋贤惠 (341)
高压水通过带波纹片定位格架五根棒束的临界热通量的实验研究	郝老迷 张君玉 刘汉洲 程 萍 张永积 傅 志 (346)
高压欠热水在带定位格架的十根束棒中的临界热负荷的实验研究	李炳书 赵依良 董振武 胡克杰 (351)
正方形排列九根棒束临界热通量的实验研究	史重淼 罗共信 王鹏飞 叶树荣 (358)
高压水强迫流动沸腾的临界热通量(摘要)	叶树荣 (364)
定位肋条、偏心度、双面加热和加热长度对套管元件临界热负荷的影响	沈文权 陈玉宙 许国华 陈忠民 赵金伶 (365)
带肋棒束表面沸腾临界热通量实验	宋贤惠 郭忠川 (374)
欠热水临界热负荷的准则关系式	钱增源 (378)
低压套管临界热负荷试验研究 (摘要)	李炳书 陈忠民 周润彬 宋玺清 (383)
用交混翼定位格架提高棒束临界热负荷的一种设想	张家骅 陈毓湘 (384)
硅光电池在传热临界监测技术中的应用 (摘要)	陈玉宙 沈文权 (391)
棒束临界热通量实验中的临界判断技术 (摘要)	朱丁盛 龙敦谊 郭似凤 穆中范 叶树荣 (392)
水纵向流经棒束通道时的湍流放热 (摘要)	李聚生 江生南 董连阁 任金廷 赵金伶 (393)
汽水混合物在水平管内流动时临界含汽量和临界后传热系数	王建民 苏春河 董连阁 蔡康元 许 农 马介亮 邢欣查 (394)
非圆形通道内的湍流换热 (摘要)	颜迪民 (402)
硝酸盐管内放热实验 (摘要)	唐芳文 苏庆善 候无惑 周景春 康蕙芝 (403)
钠在同心套管内的湍流放热	石双凯 张振灿 张永积 韩延鸿 马鸿琳 许志德 (404)
低贝克列数区钠在圆管内的放热实验 (摘要)	石双凯 张振灿 张永积 韩延鸿 马鸿琳等 (411)
欠热水在套管内表面沸腾时的放热与压降	许国华 颜迪民 陈忠民 胡克杰 (412)
高温差气体管内对流传热	程 萍 颜迪民 许国华 (418)
反应堆柱状元件的热模化试验	颜迪民 许国华 来万昌 拾景贤 (423)
气冷堆的载热效率和元件表面粗糙强化放热的最佳值判据	钱增源 (431)

压水堆中的流动不稳定问题 (摘要)	孙启才 (438)
两相流的流动型式 (摘要)	孙玉发 (438)
管内层流瞬态分析	王秀清 (439)
高压水在棒束中饱和和沸腾摩擦压降的实验研究	张伯义 王文康 程良成 (448)
高压水在棒束中加热和过冷沸腾时摩擦压降的实验研究	钱积惠 张伯义 程良成 王文康 柯小芬 (455)
水表面沸腾下摩阻压降的实验研究	张昌权 田吉安 郝俊纪 (463)
两相流中蒸汽空泡份额的测定和计算	曹富津 钱道元 方人澄 (471)
棒束流道内的两相压降试验研究 (摘要)	曹富津 钱道元 方人澄 姚日祺 黄幼三 张昌权 (478)
用半均匀模型计算两相摩擦压降 (摘要)	张会敏 (478)
七根棒元件盒内冷却剂的强迫混合	王增楼 魏连海 姚日祺 董柏年 张秀峰 (479)
圆形元件盒内交混的可视化实验研究 (摘要)	王培信 (485)
压水反应堆中冷却剂沿燃料棒束流动时的混合效应 (摘要)	张龙根 朱炳艺 (486)
流动交混因子的估算 (摘要)	周全福 (486)
关于水在单相和两相工况下垂直流过平行通道时的交混 (摘要)	蔡康元 (486)
辐照核燃料运输容器的热分析	许镜明 马志仪 (487)
反应堆内热电偶使用的几点经验	耿其瑞 吴英华 沈振新 马庆生 (495)
液态金属回路直流蒸汽发生器热工水力试验	清华大学核能技术研究所热工室 (502)
液态金属钠直流电磁泵试制总结	张振灿 石双凯 张永积 (510)
具有轴向流动的直通型迷宫的泄漏特性	钟德珍 张兆丰 蔡竹梯 刘培根 杨慧敏 (514)
元件辐照考验件流道尺寸的确定方法	陈毓湘 王杨定 (522)
工艺房间通风出口气温和热量计算 (摘要)	林启迪 (527)
压水堆一回路热功率的测定方法及误差分析 (摘要)	赵嘉煜 (527)
反应堆事故停电时流量衰减测量方法研究 (摘要)	王金软 金德圭 樊容民 董柏年 (528)
主泵断电时惰转速度、惰转流量、本泵直接变速切换试验研究 (摘要)	岑约瑟 周渝南 (528)
用弯管测流量的初步研究 (摘要)	陆祖祥 (529)
带盒组件的热管流量计算方法 (摘要)	于俊崇 (530)
激光多普勒流速计的研制 (摘要)	凌忠佩 杨怡元 李光远 蒋惠生 郝世俊 (530)
用于反应堆水力实验的涡轮流量计 (摘要)	王秀清 (531)
毕文管流量测量装置试验研究 (摘要)	刘培根 (531)
高压小压差信号的测量问题 (摘要)	王文康 张伯义 薛遵义 (531)
直流蒸汽发生器水动力稳定性的试验研究 (摘要)	毕庶勋 李怀萱 居怀明 于连成 杜淑英 (532)
研究性重水堆工艺管振动试验 (摘要)	郝兴文 金德圭 王增楼 高铁民 (533)
对热工水力试验中的测量技术及其进展的看法 (摘要)	樊容民 (533)
高温浮称液位计 (摘要)	张宝芬 王志宣 王文然 佟永宪 李善祥 (534)

元件状态试验 (摘要)	凌忠佩 潘佩霞 郑福彰 冯桂芝 (534)
石墨的导热系数 (摘要)	章靖武 彭国勋 王 法 (535)
热解碳包覆颗粒松装床的导热系数 (摘要)	郭信章 梁优彩 (535)
用直接通电加热试样法测量铀铝合金导热率 (摘要)	
.....	周海云 张 莉 吴艾菊 施国馨 (536)
多种物质集合体的导热系数 (摘要)	马志仪 (537)
热工实验室的直流电源 (摘要)	吕小玲 郝桂珍 张金文 (537)
热工实验室直流大电流测量方法介绍 (摘要)	徐荣瑜 李吉祥 (538)
热管试验研究 (摘要)	颜迪民 程 萍 许国华 刘成群 陈希瑞 (538)

中国工程热物理学会副理事长

王补宣教授的讲话

(1979年5月10日)

感谢会议领导给我到会学习的机会。谈不上什么报告，谈点肤浅的看法，算是抛砖引玉。

主席，各位代表同志：

首先，我代表中国工程热物理学会和正在筹建中的传热传质专业委员会向大会致意，祝大会在总结交流前阶段工作成果和推动今后工作上取得成功，并预祝在工程科学技术交流中取得新胜利！

这次大会是反应堆热工流体会议。从所提出的报告来看，好象涉及两大方面：一个是反应堆热物理学；另一个是反应堆工程应用技术，包括测量技术和动态控制问题。我这方面不是内行，但是也接触到一些。总的感觉，对反应堆来说，核裂变反应在物理上已相当清楚，现在主要是工程问题。要在工程上确保核反应能维持稳定、安全，同时提高经济性。要把活性区设计得既安全又先进，保证从活性区能把核反应所释放的热量及时导出来，不让它积累，否则温度就会逐步升高到超过安全限制。还要研究怎样把导出的热量最经济、最有效地加以利用。对动力堆来说，要增大功率容积密度，尽可能多地把热量导出来，最后增大堆功率。

我个人感觉，反应堆工程技术的发展，要求不断解决有关的工程热物理问题。工程热物理，就是用现代物理的知识丰富热工的研究，从这个观点来讲，工程热物理学也可叫做“物理热工学”。反应堆工程技术问题，要求我们用现代物理知识来解决反应堆热工流体问题。热工流体，在国际上正渐渐形成一个新的分支叫做热流体(thermo-fluid)和热流体工程(thermo-fluid engineering)。这也反映出当前科学发展的一个新动向，即各个学科分久必合，已在相互渗透，在新的基础上又逐渐走向综合。热工流体正发展成为工程流体力学和热工学之间的中间领域。这包括有反应性的气体的流动、液态金属的流动、有沸腾的液体流动和等离子体流动。这时，流动方程和能量方程同等重要，不能偏废，要联合求解，反映热量和物质的迁移和流动形态密切相关。例如，对流动中的液体沸腾工况来说，气泡的产生，使汽、液两相杂处，沸腾流体流型和沸腾传热恶化有着很密切的关系。这与一般流体力学所处理的均匀连续介质的流动有很大不同。液体在流动过程中受热沸腾时，积累能量的传递是需要考虑的一个主要方面，由于受热和相变引起的熵的变化已不可忽略。这次会议实际上反映出国际上热流体研究动态的一个侧面，展开了反应堆热流体方面的讨论。

这次大会提出的学术报告，除了比较成熟的水堆方面的研究以外，还有气冷堆、熔盐堆等其它方面的探讨，尽管还不成熟，也反映出国际上的动态。根据报告，高温气冷堆和快中子增殖反应堆是国外重点研究的两个方面。西德的15000千瓦高温氦气冷却试验堆已经运行了好几年，30万千瓦高温气冷堆正在建造中。据认为：如果高温气冷堆出口温度能提高到

1300℃,即使到2000年,这种高温气冷堆经济性也可以和快中子增殖堆相竞争。高温气冷堆的优点是:从动力角度看,能量可用性烔(Exergy)大,热效率高,可达到45—50%,比常规的高得多。这不仅降低了发电成本,而且因为出口温度高,可以一堆多用,不仅满足动力需要,还可以同时考虑炼钢、煤的气化等方面的需要,还可以把余热作为城市取暖之用。但是这种高温气冷堆涉及问题不少。已牵涉到所谓“气流的再层流化”,由于温度高,粘度大,出现了第二临界雷诺数;涉及到高温元件的热保护;涉及到高温差变物性问题;涉及到接触热阻;涉及到结构材料和表面材料在高温下的波谱辐射性质等一系列的基础研究。当然,在我们国家百废待举的情况下,到底应如何搞?优先搞什么堆型?兼顾搞什么?需大家讨论。

随着堆功率的日益扩大,反应堆安全问题不是小了,而是更加突出了。最近这个时期报道了美国三里岛事件,这一事件的发生;在国外,在美国、日本等国内,使人们对反应堆安全更为重视,对核污染问题更为关切。因此在安全上,需要研究大量问题,包括水堆减压时出现容积沸腾和两相流的稳定性问题,防止出现流量振荡、波动问题。同时,如何模拟问题,也要进行研究,特别是对事故出现前后这个过渡区实验研究,对模拟作用的估价问题还有争论。有人讲很好,有人说就是解决不了问题,在模拟装置上很好,而实际上可能出现问题,一定要防止万一。因为这个争论,有人主张实验规模不断发展,但我们总不能什么都搞一比一,完全用原型的实验来解决。特别在我们国家,要讲究多快好省,争取时间,节约资金,模型试验还是要,问题是如何做,如何做准,如何把理论方法和实验方法结合起来。

这次会议也提出了不少运用电子计算机和数值计算方法的研究报告,可供大家来讨论。这也反映了传热学从五十年代的以经验为主的实验科学提高到更系统理论化的程度。随着电子计算机作为计算工具的发展,出现了计算传热学这个分支。并且正在广泛发展成数学传热学,二者差别在于前者主要是使用计算机差分概念,不排斥未来在数理方程上有突破而用积分法求解。当前主要是计算传热学起作用。应该看到要进行数值计算,需要数学模型,它一定要建立在热物理模型的基础上。今天发展这样迅速,主要是从四十年代到六十年代中期积累了大量的实验资料。如果没有这些资料的积累,就很难想象对传热这样复杂的现象能提出比较成熟的模型。目前,一些更复杂的现象,包括复杂的边界条件,仍需要实验研究。特别是高精度实验检验,需要比较好的实验条件和实验技术。总的来讲,不能就事论事,应该有选择地进行机理探讨,才能提出合适的物理模型。

两相流,包括汽-液(水堆),也包括气-固和液-固(气冷堆、均匀堆),是另一个被重视的领域。出现了两相流和多相流传热传质学;这个分支,还远没有成熟。问题在哪里?实验数据不少,为什么还没很好解决?我认为现在数学模型主要都是针对连续介质的。在连续介质中,温度场和速度场在空间都应该是连续的函数,而物质的物理性质或者都保持常量,或者是温度和压力的函数,也应该是连续函数。然而,在相界面上,我们很容易看到密度是不连续的,相际温度梯度也是不连续的。液、气两相流将在相际出现蒸发传质这个物理化学反应,而组分之间的起伏湍动混合又将加速传质,提高反应速率。气固系统,在对流传热的同时,势必还有辐射传热,而在实验研究中,照例只能测定综合的效果,往往不易把两者分离开来。这就增加了基本研究的难度。两相流的介质不均匀性和不连续性,表现为不同的流态,使传统的单相连续介质传热学的计算和分析方法,出现了附加的复杂性。对沸腾传热尽管进行了长期的观察,积累了大量的实验资料,到今天为止,如果说定性的已经有了相当一致的认识,那么,定量的规律还没有得到公认,各个国家提出的计算公式相互间分歧很大,

分散度也比较大。所以，国际上小型的两相流会议几乎年年都有，大型的两年到四年一次。

如果说对稳态的传热过程到今天已经有了相对比较成熟的了解，那么反应堆的动态调节，为了满足安全控制的需要，就要求对过渡过程进行深入的探讨。在一般的教科书上，只能看到不稳定导热，而看不到不稳定对流和不稳定辐射的分析。这种新的不稳定综合传热在国际上也已经在进行研究。

我国在反应堆和核能利用上起步是较晚的，但是有许多国家也并不早。我国反应堆事业的发展曾取得了很大成绩。但是后来，特别是受“四人帮”干扰破坏，和国外的差距又拉大了，浪费了很大精力，丧失了时间。我们要承认差距，要认真响应党中央号召，认清目标，加速前进，尽快实现四个现代化。我们要贯彻执行双百方针，发挥我们社会主义制度的优越性，集思广益，群策群力，争取更大的胜利。

任务带学科，尖端带一般，这是客观规律，过去如此，现在如此，将来也如此。过去的25年里，传热传质学取得了如此迅速的发展，反应堆动力和空间技术的发展是主要的两大推动力。我个人是从事传热传质学的教学和科研的，这次到会，是来向大家学习、吸取养分的。上面讲的不一定对，有错误的地方请大家批评指正。

再次祝大会成功！谢谢大家。

西安交通大学陈学俊教授的报告

汽液两相流与沸腾换热的一些基本问题

两相流与沸腾换热在动力、化工、石油、原子能与制冷技术等许多部门均有广泛的应用。近年来,两相流与沸腾换热已成为一门新的学科分支,大大地丰富与充实了传热学与流体力学的学科内容。本文主要是概括地论述一下管内汽液两相流与沸腾换热的一些基本问题。

一、汽水两相流摩擦压降与截面含汽率

早在本世纪三十年代初期,工业比较发达的国家已经对两相流问题进行了研究,当时压力一般较低。四十年代后期,各国开始对高压、超高压的汽液两相流进行研究,尤其是近二十年来,由于工业和核电站的发展需要,两相流的研究工作得到了很大发展。对汽液两相流体在不同条件下流动时的机理、流型(流动结构形式)、流型相互转变的因素、两相的分布规律及两相摩擦压降等都作了广泛的研究。

(一)两相流体摩擦压降

在计算两相流摩擦压降方面,苏联与欧美所采用的方法是不同的。在苏联的计算方法中,摩擦压降是以均相模型作为理论基础的,认为在流动时两相混合均匀,不考虑汽水之间的相对速度,即当作单相流体看待,然后再加以修正。根据一九七三年的苏联标准,计算摩擦压降的公式如下:

$$\frac{\Delta P_{mc}}{\Delta P_0} = 1 + \bar{x} \psi \left(\frac{\gamma'}{\gamma''} - 1 \right)$$

式中 ΔP_{mc} , ΔP_0 ——分别为两相摩擦压降及单相摩擦压降;

$\bar{x}$ ——平均重量含汽率;

γ' , γ'' ——分别为饱和水与饱和汽的重度;

ψ ——修正系数,它考虑了重量流速 γw ,含汽率 x 和压力 P 的影响。

苏联密罗波尔斯基总结了许多试验结果,认为 γw 对 ΔP_{mc} 影响较大,建议按下式计算:

$$\Delta P_{mc} = \psi \Delta P_{ix}$$

式中 ΔP_{ix} 为把两相流体作为均相流动时的摩擦阻力。 ψ 试验曲线综合而得,它主要与 γw 有关;

$$\gamma w \leq 1500 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s 时, } \psi \geq 1;$$

$$\gamma w > 1500 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s 时, } \psi < 1。$$

两相流摩擦压降在欧美的计算方法中,既有以均相模型也有以分相模型作为理论基础的。采用均相模型的计算式如下:

$$\frac{\Delta P_{mc}}{\Delta P_0} = \left(\frac{\bar{\mu}}{\mu'} \right)^{\frac{1}{4}} \left[1 + x \left(\frac{\gamma'}{\gamma''} - 1 \right) \right]$$

欧美采用均相模型计算 ΔP_{mc} 和苏联有所不同,计算 ΔP_0 时所用的 λ 值,不是采用单相流体的摩擦阻力系数,而是按白劳修斯的光滑管公式计算。此外,还用了平均的混合物粘度 $\bar{\mu}$ 。

采用分相流动模型的以马蒂内利和纳尔逊为代表,在欧美、日本用得较多。认为两相流体在流动时,气液完全分开单独流动,单位管长上的气、液流动时的摩擦压降相等,流动时不考虑两相之间的相互作用力。洛克哈特和马蒂内利在分析低压水——空气两相流在水平管内的试验结果时,首先采用此法,但它用于汽水混合物并不合适,特别在高压时偏差较大。以后马、纳二氏加以改进,他们假定汽水两相分开流动时均呈紊流状态,又根据戴维得生在高压下汽水混合物的试验数据建立起以下的计算式:

$$\frac{\Delta P_{mc}}{\Delta P_0} = \Phi^2 = f(x, P)$$

式中 Φ 与 x , P 的关系以曲线图及表格形式给出。

比较好地反映重量流速影响的是美国祁思贺恩提出的计算式:

$$\frac{\Delta P_{mc}}{\Delta P_0} = 1 + \frac{C}{x} + \frac{1}{x^2}, \quad \gamma w = 1500, \text{ 粗糙管}$$

$$\frac{\Delta P_{mc}}{\Delta P_0} = \left(1 + \frac{\bar{C}}{x} + \frac{1}{x^2} \right) \psi, \quad \gamma w > 1500, \text{ 粗糙管}$$

式中 C ——系数,与 λ , γw , v_g , v_l 有关,由经验公式计算; $\bar{C}$ ——系数,与 v_g , v_l 有关,由经验公式计算。 v_g 、 v_l 分别为蒸汽和液体的比容。

祁思贺恩计算方法的偏差较小,但计算太繁,不便于应用。

影响两相流体摩擦压降的主要因素有压力 P 、重量含汽率 x 、热通量 q 、重量流速 γw 、流动方向及粗糙度。热通量对 ΔP_{mc} 的影响还与 x 有关,试验资料较少;流动方向对两相流动摩擦压降是有影响的,尤其是压力较低及 γw 较小的情况下更为明显。目前对垂直管下降流动的试验研究工作做得不够,尚未能掌握其规律。西安交大一九六二年在“水-空气”试验台上做过一些转弯两相流动压降试验研究。现有计算式中,一般都认为粗糙度对两相流体和单相流体摩擦压降的影响是相同的,实际上对二者的影响并不相同,而是随着 x 变化,还和流型有关,在这方面的试验研究亦很不够。

两相流体摩擦压降是一个较为复杂的问题,影响因素很多。以上述各国采用较多的几种计算方法来看,亦均有其局限性。一九七三年算法在 γw 小时有相当偏差。马、纳二氏算法比较适用于较低的 γw ,而祁思贺恩算法虽较接近试验值,但计算繁琐,不便应用,且在 $x < 0.2$ 时,仍有一定的偏差。西安交大近来亦进行了一定的工作,推荐了一计算式,结果与祁思贺恩计算方法接近,但计算较简便。总之目前各国对两相流体摩擦压降的理论和实验研究工作仍在继续发展中。在核反应堆中,由于燃料组件的两相摩擦压降受几何条件的影响很大,不进行必要的试验研究是无法计算准确的。

(二)截面含汽率 Φ

截面含汽率 Φ 又称真实容积含汽量,它是计算锅炉重位压差、自然循环流动压头等的重要参数。在核反应堆中它又称空洞率 α 。其计算方法概述如下:

1. 在垂直上升管中 ϕ 的计算方法

苏标1973年采用下式计算垂直上升管中的 Φ :

$$\Phi = c\beta$$

式中 c 为修正系数,可查图求得, β 为容积含汽量。

克拉密尔洛夫把汽泡穿层过程中计算 Φ 的方法用于管内流动

$$\Phi = \frac{w_0''}{w_0' + w_0'' + a}$$

式中 a 为与压力及当量直径有关的系数, w_0' 与 w_0'' 为水和汽的折算速度。此式考虑了管径 d 、流速 w 、容积含汽量 β 及压力 p 对 Φ 的影响。

奥斯玛奇金采用真实汽速与真实水速的比值,即滑动比 S 来计算:

$$\Phi = \frac{1}{1 + S \frac{1-\beta}{\beta}} = \frac{1}{1 + S \frac{\rho''}{\rho'} \left(\frac{1-x}{x} \right)}$$

密罗波尔斯基等也提出一套用 S 来计算 Φ 的方法,基本公式同上,只是 S 的计算式有所不同。

索姆亦采用滑动比的概念来计算 Φ ,他认为 S 只与压力有关,根据 P 算出 γ'/γ'' ,再查图求出 S 值,然后按上述滑动比计算 Φ 的公式计算。这一方法适用范围为 $0.01 < x < 0.5$ 。

美国班考夫提出一种变密度模型,他假设了一种汽泡悬浮于液体中的流动模型,并假定汽相浓度和混合物流速均沿截面按指数曲线分布,管壁上为零,管子中间最大,汽水之间无相对运动,提出下面计算式:

$$\Phi = K\beta$$

或

$$\frac{1}{x} = 1 + \frac{\rho'}{\rho''} \left(1 - \frac{K}{\Phi} \right)$$

式中 K 为比例系数,是指数 m 和 n 的函数, ρ' 及 ρ'' 为水和汽的密度,此公式应用有局限性,在 $x > 0.1$ 时已不适用,在低压时误差更大。

祖伯和魏立斯提出一种漂浮流动模型,计算 Φ 式为

$$\Phi = \frac{\beta}{C_0 + \frac{w_{pf}}{w_0}}$$

式中漂浮速度 $w_{pf} = (w'' - w')(1 - \Phi)$; C_0 为与 d 及 $\frac{p}{p_{li}}$ 有关的系数; w' 及 w'' 为水和汽的真实

速度。这一计算方法只适宜于 w_{pf} 较大的场合,如泡状流动及弹状流动,因此应用有局限性,而且由于 w_{pf} 中包含了 Φ 的因素,计算不便。

在核反应堆工程中, 不仅沸水堆要研究 Φ , 压水堆由于过冷区存在着表面沸腾, 因此也要研究, 如莫尔推荐的深度过冷区 Φ 的计算式如下:

$$\Phi = \frac{4\delta}{d_{dl}}$$

式中 d_{dl} 为当量直径, δ 为壁汽膜层有效厚度, 最大值为0.00011米, 或用公式计算。

2. 在垂直下降管中的计算方法

在苏标1973年中, 根据汽水混合物流速和压力查得容积含汽量的界线值 β_j , 如 $\beta < \beta_j$, 则 $\Phi = c\beta$; 如 $\beta > \beta_j$, 则 $\Phi = c' + (1 - c')\beta$ 。 c 及 c' 均为比例系数, 查有关图。此法只适用于 $w_0 \geq 0.3\text{m/s}$ 及管径 $d < 56\text{mm}$ 的情况。苏标中认为在下降流动时, Φ 总是大于 β 。

1973年杰哈连科根据试验结果得出 Φ 的变化有两个区段: 第一区段, $\Phi > \beta$; 第二区段 $\Phi < \beta$ 。两个区段分界处的 β 称为 β_j , 在 β_j 处, $\Phi = \beta$ 。他根据最小熵理论得出下式:

在 $\beta \leq \beta_j$ 区段

$$\frac{\Phi}{\beta_j - \Phi} = c \frac{\beta}{\beta_j - \beta}$$

在 $\beta > \beta_j$ 区段

$$\frac{\Phi}{1 - \Phi} = c' \frac{\beta_j}{1 - \beta_j} + (1 - c') \frac{\beta}{1 - \beta}$$

西安交大在1963年的试验研究工作中已得到与杰哈连科相同的结论, 但试验工作范围做得不够广, 试验点不多。

影响 Φ 的因素很多, Φ 值的计算还与流型有关, 如何结合具体情况精确计算 Φ 值, 还需进一步进行理论分析和试验研究。

在上述的一些计算方法中, 祖拍法只适用于泡状或弹状流动。当滑动比 $S < 3$, $P \leq 120\text{at}$, 克拉密尔洛夫、奥斯玛金及密罗波尔斯基三种方法精确度相同。但 $S > 3$ 时, 克拉密尔洛夫方法较好。苏标有一定精确度, 但无计算式, 不使用电子计算机进行计算。

对于垂直下降管中 Φ 值的计算, 以杰哈连科法考虑较全面。在 w_0 小时苏标计算数值偏高; 在 w_0 大时, 两种算法接近。倾斜管中 Φ 的研究不多, 下降管中 Φ 的研究更少, 均有待进一步进行研究。

二、两相流动水动力学稳定性

在自然循环回路与强制流动回路中, 均会出现流动不稳定性问题。流量的非周期性波动或周期性波动(脉动), 均将导致设备的损坏。对于沸水堆, 流量脉动还可能引起核反应堆的不稳定, 同时也可能造成沸腾传热恶化的过早出现。

(一)自然循环回路的水动力特性

近年来对自然循环水动力学的认识, 在提高理论计算的精确度方面, 在确定可靠性指标方面, 以及在流动过程的稳定性方面都有一些新发展。

苏联将停滞和倒流作为可靠性指标, 只对受热差的管子进行校核, 对受热强的管子未作

任何限制。美国和日本的一些资料规定循环倍率 K 不得低于某一界限值。日本的另一些资料规定垂直上升管入口最小水速为 0.3m/s ，水平管入口最小水速为 1m/s ，或规定出口 $\Phi < 0.7$ 。美国是限制上升管的 K ，是对平均受热管的限制，这实际上也既是对受热差的，也是对受热强的管子的工作状况作了限制。国内对倒流是否作为可靠性指标认为值得商讨。我国制订的水循环计算方法中以平均受热管循环倍率作为可靠性指标之一。对于亚临界参数，循环倍率 K 则是以不产生沸腾传热恶化为依据而确定的。

自然循环回路中有脉动现象，以往锅炉方面未予重视，近来有所改变。例如一些低、中压废热锅炉中的管子机械振动就与其中流动稳定性有关。对此问题给予很大注意，首先是由于核反应堆工程的需要，因脉动与压水堆蒸汽发生器工作安全问题有密切的联系。

大量试验数据说明，流量发生脉动之后，沸腾传热恶化大大提前。脉动使管内放热系数周期性的变化，尤其是始沸点附近，会产生交变的热应力，可降低管子寿命。

脉动有两种类型。一种是管间脉动，即上升管中的流量脉动时，下降管中的流量不脉动，而各上升管中流量脉动的相位、振幅可以不相同，但总流量不变。这种脉动的机理与强制流动回路中管间脉动的机理可看作是相同的，因此强制流动回路中管间脉动的计算方法和结论均可应用于这一种管间脉动。如果水冷壁中的 γw 小于 γw_{lj} 或出口 $x > x_{lj}$ 或 $K < K_{lj}$ ，则可能发生管间脉动，下标 lj 代表界限值。

另一种是回路脉动，其特点是上升管和下降管流量同时发生脉动。从自然循环的工作原理可知：在下降管阻力 ΔP_{xj} 、上升管阻力 ΔP_{ss} 以及回路运动压头 S_{yd} 中，只要任意一项作周期性变化，均将引起脉动。一般 ΔP_{xj} 不大发生变化，主要是其他两项。

因 S_{yd} 周期性变化引起的脉动是当回路出口的 x 接近于零时的冲动，主要由 Φ 的周期性变化所引起。如水的欠焓较大，水冷壁热负荷不大，当加热逐渐加大到使上升管出口产生少量蒸汽时， Φ 的数值有一突增，使 S_{yd} 突增，管中流量也突增，相对于已增加了的流量而言，加热量还不足以使出口有蒸汽时， S_{yd} 又突减，流量又相应减少，出口又可形成蒸汽，如此周而复始，引起回路脉动。这种脉动在启动过程中总是会发生的，在很低负荷时也可能发生。

因 ΔP_{ss} 周期性变化引起的脉动，与两相流的流型有关。根据一些资料发现，由泡状转变到弹状流动，或由弹状转变到环状流动，或由环状转变到露状流动时， ΔP_{ss} 通常是下降的，而且压力愈低，流型改变使阻力下降的数值愈大。流型的转变与 x ， w ， P ， d 等因素有关，当 P 及 d 一定时，主要决定于 x 及 w 。若回路出口 x 达到界限值时，流型改变使 ΔP_{ss} 突减，进入上升管的流量突增，结果使出口 x 又减少，流型又恢复原状态， ΔP_{ss} 也突增，流量又减少，如此反复引起回路脉动。只要出口 x 低于界限值(或回路 K 不小于界限值)，这种回路脉动即可防止。

在通常情况下，当吸热量一定时， ΔP_{ss} 是随流量增加而增加的，但在某种情况下，上升管出现负的阻力特性，即随流量增加而 ΔP_{ss} 反而下降，这是有加热段的汽液双相流的一个特点。如流量增加时，回路阻力下降数值大于 S_{yd} 下降数值，将不能稳定工作。

一些试验数据指出，自然循环回路进口流速与热通量 q 之间呈现出随热通量增加，流速先上升而后下降的关系。当流速随 q 增加而下降的时候， q 增加到一定程度，回路就产生了脉动，若 q 再进一步增加，就产生了传热恶化。这种情况仅在低压时存在，若压力高于60大气压，就不存在脉动，或回路进口装节流圈，亦可以推迟脉动的发生，若节流度大到一定程度，则只能产生传热恶化。

过冷度对产生脉动的界限亦有影响,而且是非单向性的。过冷度增加,促进脉动的产生,但在过冷度达到一定数值后,过冷度再增加,又不利于脉动的产生。最不利的过冷度是在10—30℃。产生这种脉动的机理说法不一,总的说来都是在一定条件组合下,系统产生了自激振荡。

(二)强制流动回路的脉动问题

在强制流动回路中的水动力不稳定性有两种:一是脉动,二是水力特性的多值性。

在强制流动回路并联的各个沸腾管中,可以产生管间脉动,也可以在几个并联管屏之间产生脉动。影响脉动的因素有 P , γw , q 及 l/d 等。 P 及 γw 增加,稳定性增加; q 增加,稳定性降低; l/d 增加,对稳定性有利。由于脉动过程的复杂性,虽然目前已积累了大量的试验资料,但还不能精确地给出发生脉动的界限。目前对脉动稳定性的界限条件,有以下三种表现方式:

1. 阻力比。苏联对管内强制流动的脉动稳定性界限用下式:

$$A = \frac{\Delta P_{jr} + \Delta P_{jl}}{\Delta P_{zf}} = f(\gamma w) = f(P)$$

式中 ΔP_{jr} , ΔP_{jl} , ΔP_{zf} 分别为加热段、节流圈及蒸发段的阻力。如出口为过热蒸汽,在分母中还应加上过热段阻力 ΔP_{gr} 。各段阻力按最低负荷计算,界限值 A 取 A 中节流程度较大的一个值。

2. 动态蓄质量系数。苏联对管间脉动的分析,提出了管内蓄质量变化的理论。根据质量守恒方程式,当进口流量减少 δG ,出口流量增加 δD 时,可得

$$\delta G + \delta D = \delta B / \tau$$

即单位时间蓄质量的变化。

当进口水量减少 δG 时,相变点向进口端移动,使管内蓄质量减少,如 $\delta B / \tau > \delta G$ 时,则出口 D 增加,即 δD 为正值,这就使含汽段阻力增加,相变点附近压力升高,而使进口 G 继续减少。因而在这样的系统中,由于外界扰动,进口 G 发生微小偏差 δG 后,具有自发增长的能力而使流动失去稳定。当进口扰动达到管子末端时,开始反向变化,形成周期性脉动。由于管间脉动与管内蓄质量变化之间存在一定的关系,因此可用后者的相对变化特性来作为确定流动脉动稳定性的一个参数。这个量即单位时间内蓄质量变化与进口流量变化之比,称为动态蓄质量系数 B_d :

$$B_d = \frac{dB}{dG \cdot \tau}$$

整理试验数据时以阻力比 A 为纵座标,以 B_d 为横座标,可以得出稳定性界限曲线。校核垂直管脉动时,尚应在阻力比计算式中计入重位压差。

3. 界限重量流速。苏联中央锅炉研究所建立了流量脉动的数学模型,用电子计算机计算取得较好的结果,它是对 $P=100\text{at}$ 下的水平管而言的,得出的界限流速计算式为

$$(\gamma w)_{js}^P = 5.38 \times 10^{-6} K_P [(\gamma w)_{js}^{P=100}] \frac{ql}{d}$$

式中 K_P 为压力的修正系数。