

破前漏分析中泄漏率模型研究进展

周 胜, 张征明*

(清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:破前漏(LBB)分析对商业核电站承压设备的安全分析至关重要, 并有许多突出的优点。目前, LBB在高温气冷堆上的应用尚不成熟, 而提出较为精确的破前漏泄漏率模型是破前漏思想能否在高温气冷堆上得以应用的关键。文章主要概述目前各国破前漏分析中泄漏率模型方面的研究进展。通过分析各个泄漏率模型的基本假设, 理论分析、计算流体力学分析、实验验证及应用实例, 分析各模型的优缺点, 理清各因素对泄漏率的影响, 并筛选可能应用到高温气冷堆破前漏分析泄漏率模型中的合理部分, 为后期高温气冷堆破前漏泄漏率模型研究提供建议。

关键词:破前漏; 高温气冷堆; 泄漏率模型; 等温流; 摩擦系数

中图分类号: TL364.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2009)S0-0084-08

Overview of Leak Rate Models for Leak Before Break Analysis

ZHOU Sheng, ZHANG Zheng-ming*

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Leak before break (LBB) analysis is very important to guarantee the safety of the pressurized equipments in a nuclear reactor. Although it has many advantages, it is not mature to apply in the gas cooled reactors (GCRs). To develop more accurate leak rate models are the key point for the applications of LBB analysis in the GCRs. Literature study was carried out concentrating on leak rate models proposed or used in LBB analysis. In each model, basic assumptions, equations for model development, experiments validation, numerical calculation and application examples were presented. From this literature study, key factors of leak rate models and their effects were analyzed and summarized, which give suggestions and instructions to new leak rate model development in the near future for the GCRs.

Key words: leak before break; gas cooled reactor; leak rate model; isothermal flow; friction factor

1 破前漏分析

一直以来, 核电站设计、建造、运行及维护

等整个过程主要以回路系统管道发生双端剪切断裂(DEGB)为基准事故。因此, 要求整个系

统即使在出现 DEGB 的情况下,仍能保证不发生熔堆事故,所以,引入很多的附加安全系统。运行经验证明,DEGB 出现的概率很低,而为此引入的各个附加安全系统使得系统设计复杂、建设成本高昂、运行维护困难,系统安全性并未大幅提升。为此,破前漏(LBB)思想逐渐得到重视和发展^[1-2]。LBB 指承压设备在设计及建造的过程中已排除了存在大裂纹的可能性,从而只存在微小裂纹。经过长时间的运行,这些微小裂纹会在自身材料特性、运行工况及附加应力荷载的共同作用下成长为贯穿裂纹,随即出现运行工质的泄漏。此贯穿裂纹继续成长,直到裂纹尺寸达到承压设备自身断裂力学特性所能承受的极限,然后发生断裂。LBB 思想假设,从初始化微小裂纹到设备发生断裂的整个过程会持续较长的时间。而通过各种反应堆泄漏率检测手段,小于极限断裂尺寸的贯穿裂纹能被提前发现,并及时排除隐患,从而避免断裂的发生。

因此,LBB 分析包括 3 个主要部分:1) 裂纹扩展机制研究,能较为精确地估计裂纹各个阶段的几何尺寸;2) 裂纹极限断裂尺寸研究,为设备安全分析提供足够的安全标准及裕度;3) 贯穿裂纹泄漏率研究,建立反应堆运行工况下安全系统检测到泄漏率与贯穿裂纹几何尺寸的对立关系,由此判断裂纹安全性。前两个部分主要涉及材料学及断裂力学分析,最后一部分主要涉及流体动力学及热工分析。经过近 50 年的发展,LBB 思想已在压水堆(PWR)、沸水堆(BWR)、重水堆及钠冷快堆(FBR)中得到较多的应用^[1-2],各核电大国也发展了各自的 LBB 分析规程。如美国的 NUREG-1061,英国的 R6,法国的 MR-RCC A16 等。

中国和法国在高温气冷堆(GCR)研究方面合作紧密。双方在 LBB 领域已进行了前期的合作与交流。GCR LBB 分析的主要困难在于泄漏率计算,因 GCR 采用可压缩氦气作为冷却工质。由于贯穿裂纹自身几何结构复杂,存在很大的不确定性,因而高温高压氦气在微米级窄间隙流道内的流动特性分析也显得异常困难。

本工作主要概述目前各国在泄漏率模型方面的研究进展。

2 水及液态钠泄漏率模型

目前,对于液体层流流动,理论分析主要基于 Poiseuille 定律,对不同几何形状流道给出对应的几何修正因子。而湍流流动则主要基于 Bernoulli 方程及 Darcy-Weisbach 摩擦系数方程。液体是不可压缩流体,因而贯穿裂纹内流体的基本物性参数保持不变。一般求解连续方程及动量方程即可得出流场分析结果,并可推导出显性的计算公式。大量的泄漏率模型研究利用水作为工质,并推广到液态钠。因为水容易获取,其相关特性已为人熟知。同时水及液态钠均可被看作不可压缩牛顿流体,有相似的流体动力学特性。

2.1 水及液态钠泄漏率模型分析

日本和法国对液态钠泄漏率模型进行了较多的研究。在欧洲钠冷快堆设计与建造指导委员会(DCRC)^[3]的报告中,液态钠的层流流动方程基于 Poiseuille 定律,但采用了椭圆形裂纹通道,因此,修改了流道几何参数及修正因子。相似的分析方法也应用于法国的 RCC-MR A16^[4](整个 RCC-MR A16 规程中关于 LBB 计算的流程已整合到计算程序 MJSAM 中)。该法规和 DCRC 报告内的层流计算公式非常相似。

上述文献中的层流质量流量计算公式均可写成如下的通用形式:

$$Q_m = \rho \frac{\Delta p \delta^2}{K \mu l} A \quad (1)$$

式中: Q_m 为裂纹出口质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; Δp 为流动压降,Pa; μ 为流体动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; l 为贯穿裂纹流道长度,m; K 为层流流量几何修正系数; A 为贯穿裂纹出口截面积, m^2 。 K 根据不同的裂纹形状进行调整, A 也要随之调整。

对于湍流流动,RCC-MR A16 基于 Bernoulli 方程,流体通过贯穿裂纹的总压降包含入口效应、摩擦压降及动压(考虑入口上游流体速度为零)。因此,得出如下的质量流量方程:

$$Q_m = \rho \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left(1.5 + \frac{\lambda l}{D_H}\right)}} A \quad (2)$$

式中: λ 为 Darcy-Weisbach 摩擦系数; D_H 为贯穿裂纹流道水力直径,m。

日本相关的 FBR LBB 规程也有相似的计

算流程及质量流量方程^[5]。不过,该模型加入了附加的几何修正系数,用以匹配对应的矩形模拟贯穿裂纹及真实疲劳裂纹的水流动实验数据。这些几何修正系数均在特定试验下获得,因此,推广到其他运行环境时存在较大的困难。

对于 Darcy-Weisbach 摩擦系数,可利用通用的流动手册进行查询,或根据本国已完成的实验进行修正。对于简化的裂纹几何模型,贯穿裂纹流道长度一般等于设备壁面厚度。前面讨论的计算方程主要用于简单等截面贯穿裂纹计算。

对于真实的复杂几何贯穿裂纹,由于裂纹扩展机制及贯穿裂纹内部几何受设备材料特性、运行环境及附加应力荷载的共同影响,因此,存在很大的不确定性。直接利用显性压降公式来详细描述诸如扭曲或旋转、渐缩或渐扩等参量和质量流量的关系存在较大的困难。因此,更可行的方法是采用修正系数,从而匹配实验结果。但这也存在较大的局限性,须进行系统而精确的实验,建立数据库,才能得到满意的结果。如果主要基于层流假设,进行理论分析,可得到简化后的关于裂纹内部存在扭曲或旋转时的压降关系。随后可将这些压降关系式推广到湍流区,这样方有助于湍流区内流动特性分析。Sheffield 大学在这方面进行了较多研究^[6-7]。在这些文献中,二维等截面锯齿形模拟裂纹通道总压降被分为摩擦压降、加速(惯性)压降及膨胀收缩压降 3 部分。至此,利用压降公式求出贯穿裂纹出口速度,再求质量流量。后两种压降因素在相关的水、空气于不同压强及雷诺数条件(层流为主)下的实验所验证,并与计算流体力学(CFD)的结果进行了对比。结果显示,根据裂纹高度选择 3 种压降能较好地描述二维等截面锯齿形模拟裂纹的流动^[6-7]。在此需强调,该流动分析集中在层流区域,且为等温流。

2.2 液体泄漏率模型小结

基于 Poiseuille 定律、Bernoulli 方程及 Darcy-Weisbach 摩擦系数方程,结合液体不可压缩性、等温流和二维等截面锯齿形流道等假设和简化,可导出水及液态钠在贯穿裂纹中的流动表达式。对于一些特殊的情况,还可根据大量的实验,加入对应的修正系数。因此,对于不可压缩流动,泄漏率模型的主要改进方面在于采用更加贴近真实贯穿裂纹的几何关系式,

从而分析三维几何对流体压降及质量流量的影响。特别是贯穿裂纹出口截面积 A (或裂纹高度 δ) 的正确估算。

如果能将不可压缩流的分析结果应用到 GCR 上,则将大幅简化 LBB 泄漏率模型。基于理想气体假设,当气体速度低于 0.3 倍当地音速时,气体即可视为不可压缩流体。如果贯穿裂纹高度 δ 非常小,再加上复杂的裂纹内部几何结构,气体在裂纹内部流道中受出入口效应、摩擦、加速(惯性)、膨胀收缩、流道分支等因素的共同作用,气体流动速度可能在 0.3 倍音速范围内。特别是氦气,由于其自身理想气体常数较大,当地音速较高,在微小裂纹中处于 0.3 倍音速范围内的几率更大。当然,当裂纹高度与晶包尺寸、流道表面粗糙度等值的比例超过一定值后,气体流动则主要集中在湍流,流速可能较高,且可能在裂纹出口达到当地音速,即出现滞止流现象,此时的质量流量不再因上游压力的增加而发生变化。

3 气体泄漏率模型

可压缩气体在真实贯穿裂纹复杂几何流道中的流动分析极为繁琐,且各因素均存在较大的不确定性。为建立有效的气体泄漏率计算模型,必须引入合理的简化假设。

本节将对基于等焓流、绝热流及等温流假设下的气体泄漏率模型作介绍。同时,还详细叙述贯穿裂纹几何及摩擦系数方面的研究情况。

3.1 非等温流泄漏率模型分析

由于受到实验条件的限制,初期的模拟贯穿裂纹气体泄漏率实验研究主要采用等截面的矩形流道。当裂纹高度远大于流道表面粗糙度时,摩擦压降和出入口效应将占主导作用(气体动压头很小)。此时,较简单的处理方式即为一维等焓流或带摩擦的绝热流。

一维定常等焓流模型忽略理想气体与壁面的摩擦及热交换。基于经典的一维气体膨胀波理论^[8],气体在模拟裂纹出口处达到当地音速。因此,直接利用滞止压强、密度比率的结果计算裂纹出口质量流量。文献[9-10]中对这种处理方式给出详细的计算流程。对于一维定常等焓流模型,理想气体假设是合理的。同时,由于气体通过裂纹时速度很高,引入绝热边界被认为

是合理的。但忽略摩擦和扰动带来的压降则可能导致较大的误差。前面已经强调,对于真实贯穿裂纹,裂纹高度很小,裂纹内部几何结构复杂,此时的沿程阻力损失及出入口效应、截面突变等局部的压力损失将很明显。因此,即便对于模拟矩形裂纹的气体泄漏率实验,该模型得到的气体流量也将高于实际流^[11]。而在 LBB 分析中,高估气体泄漏质量流量将带来非保守的评估效应,这不符合 LBB 的基本安全思想。因同等质量流量下,该模型将得到较小的贯穿裂纹高度及长度,这对正确评估裂纹的安全裕量是有害的。

文献[11-12]中还将广泛应用于工业管道体系分析的瞬变流方法与特征线算法相结合,通过求解基本的守恒方程,对气体在人工制造矩形裂纹中的流动进行更为准确的数值模拟。该算法仅假设气体流动是一维的,计算过程中可考虑上游的压力变化、摩擦阻力损失、流体与环境的热交换等因素。总的来说,该模型是较为精确的模型。但也存在一定的不足。瞬变流模型由不可压缩流体假设而推导出,这对特征线算法是有利的。但气体流速高于 0.3 倍当地音速时,需考虑气体的压缩性。此时的特征线方程会变为非线性。而直接求解非线性方程组非常困难。因此,该模型采用了弱耦合的求解方法。

法国原子能委员会(CEA)相关的实验室根据裂纹泄漏率(DEDIFAR)实验项目同时发展了等温流模型和绝热流模型。其中,绝热流模型和上述的瞬变流模型很相似。但该模型中可引入可变截面流道。该模型在计算摩擦压降时采用层流计算公式。这主要是因 DEDIFAR 实验项目与清华大学核能与新能源技术研究院(INET)实验项目的工况参数存在较大的差别。主要体现在裂纹高度上。前者裂纹高度较小,为 25 和 200 μm ,后者为 1/6~1.5 mm。前者上游压强也小一些。对氦气的预估算显示,DEDIFAR 实验条件下模拟裂纹内雷诺数低于 1 000,而后者可能超过 10 000。

3.2 等温流泄漏率模型分析

与前面提到的模型不同,英国 R6 LBB 规程则采用等温流模型。该模型最早是由 Chivers 等^[13]提出的。Chivers 提出了介于等温流和等熵流之间的多项流概念(考虑摩擦及换热)。并通

过初步理论分析的结果显示,在低马赫数下,等温流和多项流所计算的质量流量相当,而利用等温流模型将使得整个计算分析过程大为简化。且 Chivers 认为,对于 LBB 分析所涉及的微小窄间隙流动,气体和贯穿裂纹流道会有足够的热传递,这使得气体在通过贯穿裂纹时不会出现较大的温差,所以,利用等温流假设是合理的。在随后的实验项目中,该结论得到了验证^[14-15]。此处需注意,该两组实验为常温气体实验。

同时,Chivers 通过各种方式来论证摩擦压降在各种压降因素中起主导作用。所以,精确的摩擦系数计算模型是泄漏率计算的关键^[16-18]。因此,英国 R6 LBB 规程对气体泄漏率计算采用等温流模型,而后续的各种工作主要围绕引入更精确的摩擦系数来完善该泄漏率模型,以匹配实验数据。整个 R6 规程中关于 LBB 计算的流程已整合到计算程序 DAFTCAT 中。在计算摩擦系数时,该程序基于完全发展湍流假设(近壁面存在边界层)。泄漏率计算公式如下:

$$Q_m = C_D (p_0 \rho_0)^{1/2} A = C_D (p_0 \rho_0)^{1/2} (\delta \cdot 2C) \quad (3)$$

式中: C_D 为等温流泄漏率模型修正因子。

该模型采用二维等截面锯齿形流道假设,因此,锯齿形流道高度 δ 和裂纹长度 $2C$ 保持不变,且计算模型直接采用上游回路压力和密度参数。该模型首先在模拟矩形裂纹泄漏率实验中进行了验证^[19]。针对渐缩或渐扩的流道,Ewing^[20]通过实验修正了该模型。

Taggart 等^[21]引入层流流动的一些结论,对 DAFTCAT 计算锯齿形裂纹泄漏率进行了修正。Taggart 指出,锯齿形流道内不可压缩层流的流动趋势和结论可推广到 DAFTCAT 所计算的完全发展湍流流动中。与文献[22]相似,Taggart 主要考虑 3 种修正因子,即摩擦、加速(惯性)及膨胀收缩(回流)。该模型在计算加速(惯性)压降及膨胀收缩(回流)压降时与文献[22]中的公式相近。Taggart 运用修正后的模型和已有的实验项目^[16,23]进行对比,评估了上述 3 项因素在不同贯穿裂纹高度及表面锯齿数量(尺寸)对质量流量的影响。结果表明,利用层流压降分析结论修正 DAFTCAT 是可行且有效的。这也说明不可压缩层流流动的一些结论可推广到可压缩湍流流动中。

3.3 贯穿裂纹几何描述研究概述

1) 裂纹高度计算及其与裂纹表面粗糙度或扭曲度尺寸比率

裂纹高度值直接用于计算裂纹出口流量,而比率则是裂纹表面有效粗糙度的选取标准。

目前,贯穿裂纹高度值依赖于实验、有限元分析及简化的计算模型。文献[23]概述了当前计算裂纹高度所涉及的主要因素。特别对GE/EPRI方法和Tada/Paris方法进行了对比分析。这两种方法也是当前裂纹高度计算的基础。裂纹高度计算主要考虑3种效应:弹性形变,塑性形变及蠕变。也有一些简化的模型,直接由设备应力计算得出,如RCC-MR A16^[4]。

当前,分析表明,裂纹高度和裂纹内部流动参量并不独立,而是存在很大的耦合性。因此,直接单独利用裂纹高度或表面粗糙度、扭曲度是不合理的,而应将他们结合起来,进而用裂纹高度 δ 与贯穿裂纹内表面锯齿轮廓总高度 R_{glamp} 比率作为计算裂纹内表面有效粗糙度 R_{eff} 、裂纹有效锯齿数量 N_{eff} 和裂纹有效深度 l_{eff} 的标准。文献[6-7, 22]对这一耦合关系进行了详细地论述。结果显示,通过引入这一耦合关系,能更精确地估算裂纹泄漏率。

2) 裂纹出口截面假设

裂纹出口截面假设主要有3种:矩形、椭圆形及菱形。当前,在真实裂纹泄漏率计算时,习惯采用椭圆形截面假设,这源于实验及有限元计算,且在LBB法规中应用^[4-5, 24-25]。

3) 裂纹宏观渐缩渐扩分析

前面已经提到,裂纹三维效应分析主要集中在 δ 和 $2C$ 。为便于实验分析,一般将这两个参数分开,以获取对泄漏率的影响规律。研究表明,直接使用裂纹出口处的 δ 和 $2C$ 计算泄漏率流量可能存在偏差,而应加上渐缩渐扩因子^[20, 24]。英国的R6规程已使用了该结论。

对于同时考虑 δ 和 $2C$ 的变化,目前能找到的结果只有法国CEA基于大量的有限元分析提出的 δ 和 $2C$ 椭圆形分布^[26]。该三维几何模型尚未用于泄漏率分析。通过三维几何描述来进行LBB分析无疑更加精确。

3.4 摩擦系数研究概述

从上述内容可看出,在英国R6 LBB规程的框架下,等温流模型中存在较大不确定性的

是贯穿裂纹表面粗糙度的选取及摩擦系数的计算。不同设备材料在不同裂纹扩展机制下所形成的贯穿裂纹存在很大的不确定性。因此,表面粗糙度参数的选取只能依靠积累的有关数据库。摩擦系数则可通过更加系统的实验分析来获取较为精确的计算公式。同时,摩擦因素在R6规程中被描述为最重要的压降因素。因此,本节将单独概述有关摩擦系数的研究概况。

1) 摩擦系数公式

目前,关于摩擦系数的计算主要基于Nikuradse的管道内喷射沙粒流动经典实验结果。该结果给出了层流区、湍流光滑管及粗糙管的摩擦系数分布,即人们熟知的Moody图。Moody图中所描绘的层流区摩擦系数最高为0.12。而对于GCR LBB所研究的微小窄间隙流动,在文献[14, 27-28]中发现,该系数可能超过或远大于1。一般认为,区分层流和湍流的雷诺数界限为2300。而对于GCR LBB所研究的微小窄间隙流动,区分层流和湍流的雷诺数界限可能比经典的结论低很多。比如,Spence等^[27]观察到雷诺数仅为500时就出现了湍流现象。

对于层流流动,摩擦系数为:

$$\lambda = K/Re \quad (4)$$

式中: Re 为雷诺数;针对不同的流道几何,流量计算几何修正系数 K 将发生变化。

对于湍流流动,从边界层理论出发,Nikuradse建立了摩擦系数与管道半径 r 及喷射沙粒尺寸 K_s 的关系式:

$$\lambda = \left[2 \lg \frac{r}{K_s} + 1.74 \right]^{-2} \quad (5)$$

该管内流动结论可推广到GCR LBB所研究的简化二维等截面流动中。这方面的工作主要有Button^[14]的人工模拟流道实验、Spence等^[27]真实疲劳贯穿裂纹在不同荷载所至的裂纹高度及上游压强条件下进行的空气泄露实验及Gardiner和Tyrrell^[28]的水泄漏实验。这些实验分析结果均可得到如下通式:

$$\lambda = \left[a \lg \frac{\delta}{R_{eff}} - b \right]^{-2} \quad (6)$$

式中: a 、 b 代表通式内的常数。

在文献[21]中,作者对上述的各种湍流区摩擦系数进行了对比,同时还加入了基于两相

流模型的 LBB 泄漏率计算程序 SQUIRT^[25] 的结果。还利用这些摩擦系数公式对两组实验数据^[16,29]进行了对比计算,结果显示,利用 Spence 等^[27]的摩擦系数公式计算气体泄漏率更为精确。

2) 摩擦系数边界分析

Chivers 为了更好地评估摩擦系数对质量流量的影响,对层流及湍流摩擦系数进行了系统地分析,并计算出对应的摩擦系数边界,以量化摩擦系数的不确定性^[16,18]。

对于贯穿裂纹内层流流动,公式 $\lambda = K/Re$ 中, K 在各文献中的下边界值为 96,上边界存在差异。文献^[14,28,30]中 K 的上限分别为 600、500 和 250。Chivers 选定 96 和 250 作为上、下限。利用 DAFTCAT 计算对应的质量流量差异倍数接近 2.5。

对于裂纹内湍流流动, R_{eff} 值取为 3 ~ 10 μm 。摩擦系数下限取 $\lambda = 0.316Re^{-0.25}$ ^[14], 上限取 4^[28]。结果显示,对于湍流摩擦系数上限不应超过 1,否则,须对摩擦系数进行敏感性分析,以确定其对裂纹泄漏率的影响。

3.5 气体泄漏率模型分析小结

等熵流是可压缩气体流动的理想状态。可从经典的气体动力学理论出发推导出解析解。这有助于理解贯穿裂纹内气体的流动特性,是提出新泄漏率模型的基础。对于大部分基础性等截面模拟贯穿裂纹泄漏率实验研究,如果裂纹高度较大,一维等熵膨胀理论得出的结果高于实验结果的幅度不会很大。如果是变截面贯穿裂纹泄漏率实验研究,准一维喷管膨胀理论^[8]可用作初步理论计算。

更进一步精确的模型是带摩擦的绝热流,或是基于管道流动而考虑壁面换热的模型。这对于分析一些基础性等截面贯穿裂纹泄漏率实验研究结果是有效且可行的。对于变截面流动则困难大一些。特别是当贯穿裂纹高度与裂纹自身表面粗糙度、扭曲度等相当时(真实的 GCR LBB 分析情况),通过推导得出显性计算公式是非常困难的。此时,可考虑运用 CFD 计算软件或自编程序进行求解。

等温流假设不涉及温度计算。这与前面提到的等熵流、绝热流存在较大的差异。后两者在气体出口流速较高的情况下均会出现出口温度

骤降的分析结果。对于 GCR 额定运行工况,高温冷却气以较高的速度流出贯穿裂纹出口,如果泄漏气体在裂纹出口处温降较大,对裂纹出口材料特性及出口局部裂纹扩展机制将造成影响。基于英国 R6 LBB 规程及等温流假设,单相气体泄漏率计算程序 DAFTCAT 拥有较多的实验对比验证数据,是较为成熟的计算模型。

由于真实贯穿裂纹内部几何结构复杂,对其详细地进行压降分析很困难。基于现有的泄漏率模型,引入简化后的三维几何模型描述及压降因子,对其进行修正是可行的。而运用真实疲劳裂纹或蠕变疲劳裂纹进行气体泄漏率实验将对模型提供可靠的验证数据。

4 两相流泄漏率模型概述

商业水堆核电站在全世界得到了大量推广。LBB 思想也被广泛地应用到水堆上。受此推动,两相流泄漏率模型在 LBB 中的分析应用得到了深入研究。各国编制相应的贯穿裂纹泄漏率计算程序,诸如美国的 SQUIRT^[25]、PICEP,法国的 ASTEQ、LRCPC,德国的 FLORA 等。这些程序可用来计算各种反应堆工况下冷却剂的质量泄漏率。这些计算程序主要基于两种临界两相流模型:Moody 的均匀化平衡态临界流模型^[31]和 Henry-Fauske 均匀化非平衡态临界流模型^[32]。

两相流模型基于基本的压降分析,从而计算质量流量。虽然两相流模型不能直接运用到 GCR 泄漏率分析中,但其基本分析思路及各种泄漏率影响因素可推广到 GCR 中。且这些程序在实验研究与反应堆运行中积累了大量的数据及经验。因此,详细分析模型之中各项的关系能为提出新的气体泄漏率模型提供参考。

5 LBB 的泄漏率概率分析模型概述

前面所讲述的 LBB 规程及贯穿裂纹泄漏率计算模型均只针对单一裂纹。真实的反应堆运行状态下可能在几个较大的区域内同时出现多个裂纹。此时的单个裂纹冷却剂泄漏量可能不足以达到 LBB 规程所指定的临界泄漏量。但多个更小的贯穿裂纹同时作用,所形成的总的泄漏率有可能被监测系统所探测到。针对这一情况,提出对应的泄漏率概率分析模型是必要的。

当前,美国开发了基于标准 Monte-Carlo

概率分析方法的 PSQUIRT^[33] 软件。该软件能结合之前描述的 SQUIRT 计算程序,对管道裂纹泄漏率作概率分析,以便更加精确地评估 LBB 思想在压水堆中的应用。英国也基于 R6 规程,引入了概率分析方法^[34]。

Electric power research institute (EPRI) 和 Battelle Columbus 合作提出了不同的压水堆裂纹泄漏率模型^[35]。文献^[36]结合该泄漏率模型和标准 Monte-Carlo 概率分析方法进行了较为系统的泄漏率概率分析。

可以看出,LBB 裂纹泄漏率概率分析非常重要,并已在压水堆和重水堆中得到了应用。当然,这一分析方法需建立在准确而有效的单一裂纹泄漏率模型基础之上。对于 GCR,单一裂纹泄漏率模型还不成熟,因此,直接进行泄漏率概率分析是不可取的。

6 结论

本文主要概述了目前各国破前漏分析中泄漏率模型方面的研究进展。通过分析各泄漏率模型的基本假设、理论分析、计算流体力学分析、实验验证及应用实例,得出了各模型的优缺点,理清了各因素对泄漏率的影响以及可能应用到 GCR 破前漏分析泄漏率模型中的合理部分。通过上述分析,提出较为精确的 GCR LBB 泄漏率模型应考虑以下几方面。

1) 需根据 GCR 的实际运行工况及现有泄漏率检测技术、贯穿裂纹内气体流动特性判定流动类型。当裂纹内气体流速不高时,不可压缩流的一些流动结论可应用到 GCR LBB 分析中,但要基于合理的假设及计算。

2) 应区分对待且正确评估不同裂纹高度下等温流、多项流及带摩擦绝热流等模型对泄漏率计算结果的影响。

3) 在已有一维或二维泄漏率模型基础上引入三维贯穿裂纹几何描述。分析宏观参量(裂纹高度、裂纹长度、裂纹流道深度)及微观参量(局部粗糙度、锯齿数量、总体粗糙度)对流动参数的影响。结合裂纹三维几何描述,在现有摩擦系数研究基础上减小不确定性。

4) 利用其他反应堆 LBB 应用的成熟经验或分析方法指导 GCR LBB 泄漏率模型研究。

5) LBB 泄漏率概率分析非常重要,但须建

立在合理的单个裂纹泄漏率模型之上。该项内容应为泄漏率模型研究的后期工作。

参考文献:

- [1] IAEA. Guidance of the application of the LBB concept, IAEA-TECDOC-774[R]. Vienna: IAEA, 1994.
- [2] IAEA. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety primary piping in PWRs[R]. Vienna: IAEA, 2003.
- [3] DCRC. Leak before break procedures for sodium boundary components [R]. [S. l.]: [s. n.], 1992.
- [4] CEA. RCC-MR A16 guide for leak before break and defect assessment[R]. France: CEA, 2002.
- [5] CRIEPI. Evaluation method of sodium leak for FBR components[R]. Japan: CRIEPI, 2000.
- [6] BAGSHAW N M. A study of leak rates through narrow cracks [D]. Sheffield: Department of Mechanical Engineering, 2000.
- [7] BAGSHAW N M, BECK S B M, YATES J R. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C[C]. London: Professional Engineering Publishing Ltd., 2000.
- [8] ANDERSON J D. Fundamentals of aerodynamics [M]. Fourth Edition. [S. l.]: Mc Graw Hill, 2001.
- [9] LEJEAIL Y, CABRILLAT M-T, KRAKOWIAK C. 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology[C]. Beijing: [s. n.], 2004.
- [10] ZHANG Z M, HE S Y. 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology[C]. Beijing: [s. n.], 2004.
- [11] ZHANG Z M, HE S Y. Study on leak rate of gas medium in leak-before-break technique-II: Theoretical studies[J]. Nuclear Technology, 2007, 160(2): 178-186.
- [12] ZHANG Z M. Studies on leak rate problems of leak-before-break algorithm[D]. Beijing: Institute of New and Nuclear Technology, 2006.
- [13] CHIVERS T C, MITCHELL L A. On the limiting velocity parallel bore tubes[J]. Journal of Physics D: Application Physics, 1971, 4: 1 069-1 076.
- [14] BUTTON B L, GROGAN A F, CHIVERS T C,

- et al. Gas flow through cracks[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1978, 100(4): 453-458.
- [15] SHARPLES J K, CHIVERS T C, BOUCHARD P J. New leak-before-break procedures within the R6 framework[J]. *Pressure Vessels and Piping*, 1996, 323: 257-265.
- [16] CHIVERS T C. Proceedings Seminar on Leak Before Break in Reactor Piping and Vessels[C]. Lyon; [s. n.], 1995.
- [17] CHIVERS T C, RADCLIFFE S J. Friction measurements on Hosier systems (international) Ltd Bodyguard(tm) coatings[R]. [S. l.]: [s. n.], 1996.
- [18] CHIVERS T C. The influence of surface roughness on fluid flow through cracks[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2002, 25(11): 1 095-1 102.
- [19] MANNING P T. Influence of surface roughness on gas flow through cracks[J]. *Wear*, 1979, 57(2): 365-376.
- [20] EWING D J F. Proceeding of International Conference on Pipework Engineering and Operation [C]. [S. l.]: [s. n.], 1989.
- [21] TAGGART J P, BUDDEN P J. Leak before break: Studies in support of new R6 guidance on leak rate evaluation[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*, 2008, 130(1): 58.
- [22] BECK S B M, BAGSHAW N M, YATES J R. Explicit equations for leak rates through narrow cracks[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2005, 82(7): 565-570.
- [23] RUDLAND D L, WANG Y Y, WILKOWSKI G. Comparison of crack-opening displacement predictions for LBB applications[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2002, 79(3): 209-217.
- [24] MATSUMOTO K, NAKAMURA S, GOTOH N, et al. Study on crack opening area and coolant leak rates on pipe cracks[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1991, 46(1): 35-50.
- [25] PAUL D D, AHMAD J, SCOTT P M, et al. Evaluation and refinement of leak-rate estimation models: Topical report[R]. Columbus: [s. n.], 1994.
- [26] KRAKOWIAK C, KAYSER Y, DESCHANELS H. Leak before break procedure for high temperature and gas fast reactors-crack opening profile studies for complex-shaped defects in thick components[R]. [S. l.]: [s. n.], 2008.
- [27] SPENCE G S M, WILKINSON J, CHANDLER R F. Leakage flow through small cracks-report of second stage of experimental work[R]. Risley; [s. n.], 1991.
- [28] GARDINER G C, TYRRELL R J. The flow resistance of experimental models of naturally occurring cracks[J]. *Proc Inst Mech Eng*, 1986, 200 (C4): 245-250.
- [29] SHARPLES J K, CLARKE P W. Background to leakage guidance given for leak-before-break assessments[R]. [S. l.]: [s. n.], 1992.
- [30] JONES T A, WOOTEN S O, KALUZA T J. The 63rd Annual Technical Conference of the Society of Petroleum Engineers[C]. Houston, USA; [s. n.], 1988.
- [31] MOODY F J. Maximum flow rate of a single component, two-phase mixture[J]. *J Heat Transfer*, 1965, 87(1): 134-142.
- [32] HENRY R E, FAUSKE H K, MCCOMAS S T. Two-phase critical flow at low qualities, Part II: Analysis[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1970, 41: 92-98.
- [33] RAHMAN S, GHADIALI N, WILKOWSKI G M, et al. Computer model for probabilistic leak-rate analysis of nuclear piping and piping welds [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1997, 70(3): 209-221.
- [34] BEARDSMORE D W, YELLOWLEES S F, SHARPLES J K, et al. A probabilistic application of the R6 detectable leakage leak-before-break procedure[J]. *Pressure Vessels and Piping*, 2002, 437: 97-104.
- [35] EPRI. Materials reliability program: Leak-before-break evaluation for PWR alloy 82/182 welds (MRP-140)[R]. Palo Alto: EPRI, 2005.
- [36] CIZELJ L, ROUSSEL G. Probabilistic evaluation of leak rates through multiple defects: The case of nuclear steam generators[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2003, 26(11): 1 069-1 079.