

压力容器缺陷安全评定研究进展和衰减路径速度积方法

陈贵堂

贵州省特种设备检验检测院 贵州 六盘水 550014

【摘要】：从实际发展角度分析，此类压力容器缺陷存在多样性、隐蔽性的特征，对试验安全造成较为严重的影响，对压力容器缺陷安全的评定成为科学家的主要研究内容。本文将针对压力容器缺陷安全评定研究现状以及衰减路径速度积方法相关问题进行研究，希望对相关工作人员提供参考意见。

【关键词】：压力容器；安全评定；衰减路径

引言

现阶段学界内对相关问题的研究主要集中在失效机理、安全评定准则等方向，通过大量理论研究以及实践验证形成多种安全评定标准以及技术规范。但是现行标准在实际应用中仅能针对缺陷是否安全给出结论，难以实现对安全程度进行评价。因此，近年来学界内在进一步完善的已有评定方法的同时，也将安全裕度纳入到研究范围之内。

1 压力容器安全评定研究现状

当前阶段，国内外学界在针对压力容器安全性评定研究过程中，主要基于线弹性断裂以及塑性失稳两种情况下进行研究，通过专家学者的大量实践以及理论研究，在上述两种极端情况之间存在过渡性质的失效状态。由此，在实际针对压力容器安全性评定的研究中需要将两种退化的极端情况判据纳入到评定体系之中，以实现反映其失效状态的目的。国外学者基于此观点提出双判据失效评定图，比较有代表性的如美国 EPRI 准则。

西方学者在后续研究过程中，结合双判据评定图，围绕弹塑性断裂力学理论，提出利用评定图理论延展出的射线法以及平行线法对压力容器缺陷安全裕度进行表征，具体如图 1 所示。

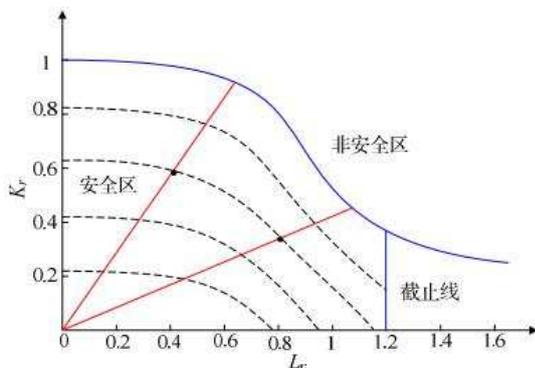


图 1 缺陷安全性评估射线法及平行线法

英国中央电力局在实际发展过程中围绕现有理论以及实际应用需求，在充分综合 J 积分理论的前提下形成一种新的容器安全评定曲线，该曲线在学界内也被称之为新 R6 曲线。在基于新 R6 曲线形成的评定图中，其纵轴及横轴分别为断裂比 K_r 以及荷载比 L_r ，横轴对所检测容器结构应对脆性断裂作用的韧性进行表征，纵轴则对所检测容器结构音轨塑性失稳作用的抗力进行表征。在依据新 R6 曲线进行容器安全裕度评定过程中，可以利用外侧包络线作为失效评定曲线，该曲线与 $L_e = L_{rmax}$ 呈现出垂直相交的态势。该曲线定义可以表示为 $K_r = f(L_r)$ ，在实际进行评定时，共有三种曲线可以选择，其中 K_r 与 L_r 计算可以依照公式 $K_r = K_I / K_{IC}$ 以及 $L_r = P / P_0$ 进行计算。其中 K_I 以及 K_{IC} 分别表示 I 型裂纹缺陷的应力强度因子以及材料常数；P 及 P_0 分别表示容器裂纹区域荷载以及材料屈服荷载。研究者在后续研究过程中，在综合考量国际 2004 评估标准的基础上，对 R6 曲线进行更深层次的研究，并在已有理论成果基础上，提出简化评定、常规评定以及分析评定三种新的安全裕度评估模式。在对容器进行安全评估过程中需要依据已知参数对 K_r 与 L_r 进行计算，并依据计算结果进行分析，如果计算得出的坐标点处于安全区内这可认定该缺陷安全，反之则需要立即停止容器运转并进行相应处理。

2 基于路径速度积的安全评定方法

2.1 路径速度积概念及计算方式

针对容器缺陷威胁的表征，研究者在结合相关理论以及实践研究后提出，利用评定图中缺陷安全评定点到安全临界线的距离 S 以及与之相关联的失效速率 v 进行，即通过容器缺陷裕度 M_s 与衰减路径距离及失速效率之间的相关性进行研究实现安全评定的目标，而这种相关性可以利用路径速度积概念进行表示，具体如图 2 所示。

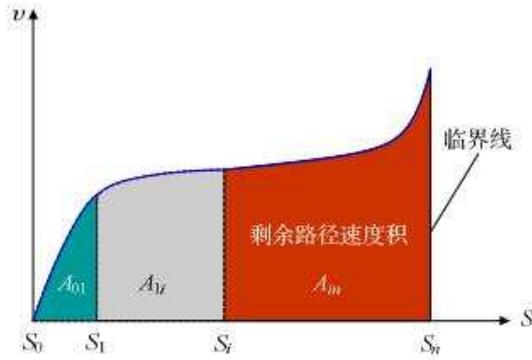


图2 表面裂纹情况下的路径速度积

依据学界内对曲线积分物理含义的界定，对稳定扩展阶段中任意选择的评定点 i 的路径速度积 A_i 的定义可以利用如下公式表示：

$$A_i = \int_{S_0}^{S_i} v(S) dS$$

由此可见，路径速度积在 $S-v$ 曲线图中的表现为失效速度曲线及横轴衰减路径距离之间的包络线面积。依据图 2 所示信息，可以利用如下公式对 A_i 以及 A_j 这两个任意评定点速度积进行定义：

$$A_{ij} = \int_{S_i}^{S_j} v(S) dS$$

在特殊情况下，针对容器缺陷的全域路径速度积 A 可以利用如下公式进行定义：

$$A = \int_{S_0}^{S_n} v(S) dS$$

以试验所得容器裂纹衰减路径为例，通过对其失效速率进行仿真计算可得出 $v(S)$ 曲线，在利用拉格朗日插值法对曲线中的离散点点集进行拟合处理，可得相应的拟合公式，如下所示：

$$v(S) = b_1 S + b_2 S^2 + b_3 S^3 + \dots + b_M S^M = \sum_{i=1}^M b_i S^i$$

其中， b_i ($i = 1, 2, \dots, M$) 为常数。

若曲线断裂比以及荷载比可以用如 $K_r = \varphi(N)$ 以及 $L_r = \psi(N)$ 的显函数表示，则依据衰减路径距离增量 ΔS 的定义可以得出如下所示的微元 ΔS 表达式：

$$dS = \left[\left(\frac{d\varphi}{dN} \right)^2 + \left(\frac{d\psi}{dN} \right)^2 \right]^{1/2} dN$$

将该式与失效速度公式代入到速度积定义式中，同时对

衰减路径距离循环次数进行调整，即将 S_0 到 S_i 循环次数由 N_0 调整为 N_i 可得出如下所示 $L_r - K_r$ 图转换为 $S-v$ 曲线图的路径速度积大小计算公式：

$$\begin{aligned} A_i &= \int_{N_0}^{N_i} \left[\left(\frac{d\varphi}{dN} \right)^2 + \left(\frac{d\psi}{dN} \right)^2 \right]^{1/2} \frac{dS}{dN} \cdot dN \\ &= \int_{N_0}^{N_i} \left[\left(\frac{d\varphi}{dN} \right)^2 + \left(\frac{d\psi}{dN} \right)^2 \right] dN \end{aligned}$$

2.2 安全裕度计算

从实际研究结果进行分析，容器缺陷的全域路径速度积可定义为 $A = A_i + A_{im}$ ，在给定荷载的条件下，安全系数可通过 $F_s = A_i/A$ ，对评定点 S_i 的安全裕度 M_s 计算可以利用如下公式进行：

$$M_s = 1 - F_s = \frac{A_{in}}{A}$$

在实际对容器进行安全评定过程中，当其缺陷评定点在疲劳作用下不断向临界线靠近条件下，其剩余路径速度积 A_{in} 会逐渐趋向 0，而此特征与缺陷安全度衰减规律基本保持一致。此时应认识到的一点是，如果此时稳定扩展区范围内任意评定点失效速度呈现出一致特征且此数值等于常数 C ，即 $v = ds/dN = C$ ，将其带入至速度积定义式后，上文所述安全裕度计算式会自动转化为如下公式：

$$M_s = 1 - F_s = \frac{(C_t - C_i)}{C_t} = \frac{C_n}{C_t}$$

即此次安全裕度评定计算转化为不对失效速度进行考量的衰减路径评定法进行计算。

在实际进行安全裕度评价过程中，如果研究人员在埋藏裂纹路径上选择安全评定点，则此次安全裕度计算需要进行分别计算，即针对埋藏裂纹以及表面裂纹路径速度积 ($A_{01} + A_{12}$) 以及 A_{3i} 进行组合计算，具体如图 3 所示。

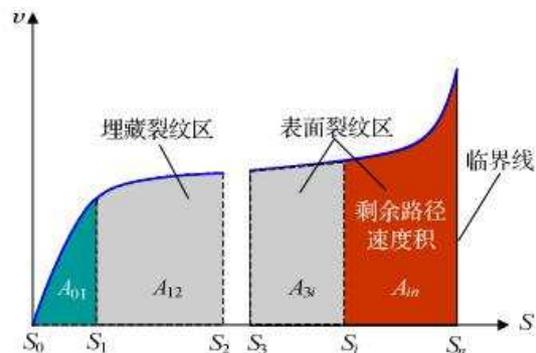


图3 埋藏裂纹情况下的路径速度积计算

依据相关研究成果显示阶跃会随着埋藏裂缝不断扩大而出现,此时期路径速度积可利用图3中 A_{01} 、 A_{12} 两个部分表示,即 $(A_{01} + A_{12})$ 。表面裂纹路径速度积这可利用跃点右侧阴影面积进行表示,即 A_{3i} 。二者面积大小可利用率如下公式计算:

$$\begin{cases} A_{01} + A_{12} = \int_{S_0}^{S_1} v dS + \int_{S_1}^{S_2} v dS = \int_{S_0}^{S_2} v dS \\ A_{3i} = \int_{S_3}^{S_i} v dS \end{cases}$$

其中, S_1 与 S_2 、 S_3 与 S_i 分别为埋藏裂纹及表面裂纹的起

始点到终点以及起始点到评定点的衰减路径距离。

在此情况下,对容器评定点的安全裕度的计算可以利用如下公式进行:

$$M_s = 1 - F_s = 1 - \frac{A_{01} + A_{12} + A_{3i}}{A} = \frac{A_{in}}{A_{01} + A_{12} + A_{3i} + A_{in}}$$

总结:综上所述,在当前压力容器发展趋势背景下,进一步提升安全裕度计算方式有效性已经成为当前学界内的重点研究内容。本文所研究的基于速度积的安全裕度计算方法有效弥补了其他计算方式的短板,从实际发展角度分析,具备继续深入研究的价值。

参考文献:

- [1] HOANGVanThanh,龙伟,田大庆,等.风洞实验压力容器表面裂纹安全衰减路径研究[J].机械设计与制造,2019(9):4.
- [2] 黎佳,宁朝阳.含裂纹缺陷压力容器失效仿真及安全裕度研究[J].2021(2015-1):1-3.