

多荷载联合作用下含穿透裂纹接管安全评定

喻健良^{*1,2}, 董 硕^{1,2}, 闫兴清¹, 刘 明¹

(1. 大连理工大学 化工机械学院, 辽宁 大连 116024;

2. 中国纺织工业设计院, 北京 100037)

摘要: 对多种荷载联合作用下含缺陷压力容器的安全评定目前仍无可靠方法. 采用三维有限元方法, 对含肩部穿透裂纹接管在内压和弯矩联合作用下安全评定所需的断裂比和荷载比进行求解. 研究表明, 断裂比可根据内压和弯矩作用下裂纹的应力强度因子 K_{Is} 得到, K_{Is} 为仅受内压下应力强度因子与仅受弯矩下应力强度因子的线性加和. 荷载比由实际外载、内压作用下接管极限内压 p 与弯矩作用下极限弯矩 m 求出, 给出了内压和弯矩联合作用下接管极限荷载与 p 、 m 的关系. 所得结论可用于内压和弯矩作用下含肩部穿透裂纹接管的安全评定.

关键词: 安全评定; 穿透裂纹; 断裂比; 荷载比; 应力强度因子; 极限荷载

中图分类号: O346.1 **文献标志码:** A

0 引言

至2008年年底全国已办理使用登记的压力容器195.6万台,比2007年增加13.53%;压力管道 63.3×10^4 km,比2007年增加1.8%^[1].在数量增加的同时压力容器和管道也在向高参数、大型化不断发展.而受到复杂外载作用的复杂结构也不可避免地出现各类缺陷.对于这类缺陷必须经过安全评定方可使用. GB/T 19624—2004《在用含缺陷压力容器安全评定》^[2]并没有明确给出在两种及两种以上荷载联合作用下对含缺陷压力容器安全评定的方法.已发表的文献中,对单一荷载下含缺陷压力容器的安全评定研究较多^[3-6],而多荷载下安全评定方法在国内外仍未见报道.本文仅研究在内压和弯矩联合作用下含肩部穿透裂纹接管的安全评定,可为在复杂外载作用下复杂结构的安全评定起指导和参考作用.

根据GB/T 19624—2004中缺陷的常规评定方法,使用失效评定图需要得知两个量:断裂比 K_r 与荷载比 L_r . K_r 与内压和弯矩作用下裂纹的应力强度因子 K_{Is} 有关; L_r 与 p 和 m 有关,其中 p 为内压单独作用时接管极限内压, m 为弯矩单独作用时接管极限弯矩.本文先求解 K_{Is} 、 p 和 m ,而后求出 K_{Is} 、 p 、 m 与 K_r 、 L_r 的关系式,最终给出安

全评定的方法和步骤.

1 有限元模型

1.1 模型建立及网格划分

为真实反映相贯线及裂纹,首先计算出相贯线及裂纹所需各节点的三维坐标,而后由下至上建立有限元模型.接管几何结构如图1所示.求 K_{Is} 时接管材料应力应变关系为线弹性,弹性模量 $E=2.07 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu=0.3$.求 p 和 m 时接管材料应力应变关系为理想弹塑性, $E=2.07 \times 10^5$ MPa, $\nu=0.3$,屈服强度 $\sigma_s=320$ MPa.

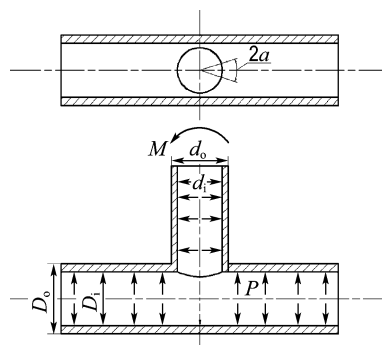


图1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

收稿日期: 2010-04-04; 修回日期: 2012-03-04.

作者简介: 喻健良^{*} (1963-),男,博士,教授,博士生导师, E-mail: yujianliang@dlut.edu.cn.

有限元程序采用 ANSYS, 裂纹尖端采用 SOLID95 退化奇异单元, 外围采用 SOLID45 单元. 考虑结构和荷载的对称性, 取 1/2 模型进行研究. 为协调计算时间和精确性, 本模型在主管厚度方向取 3 个单元, 在支管厚度方向取 2 个单元, 沿相贯线周长建立 30 个单元^[7]. 接管有限元模型如图 2 所示, 裂纹局部放大图如图 3 所示.

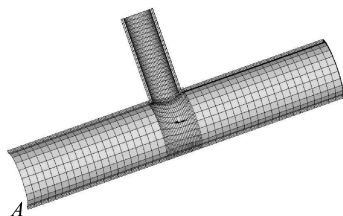


图 2 有限元模型
Fig. 2 Finite element model

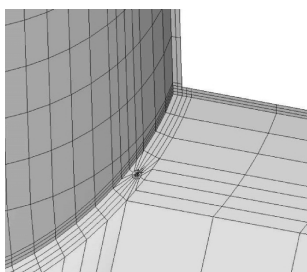


图 3 裂纹放大图
Fig. 3 Crack enlargement diagram

1.2 荷载、约束及求解设置

将内压施加在接管和容器的内表面、穿透裂纹表面. 将弯矩转换成成对的力偶施加在接管上端面的各个节点上(如图 4 所示), 由含裂纹的接管肩部向无裂纹的接管肩部扭转(如图 1 所示).

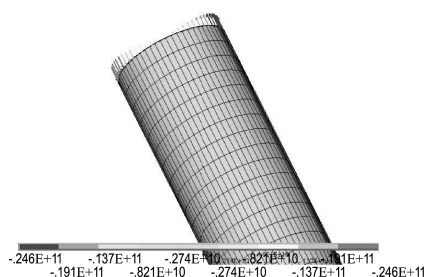


图 4 弯矩图
Fig. 4 Moment diagram

约束结构对称面上法线方向的自由度. 为了模拟容器和接管端部封闭的情况, 同时保证结构

的对称性, 在容器的两端约束节点水平方向自由度. 容器左端最下面取节点 A(见图 2), 约束 A 点全部自由度. 为了避免约束造成的边缘效应, 接管和容器的直管段长度为 3 倍的各自直径.

采用 ANSYS 自带的模块求解 K_{Is} . 在裂纹尖端定义一个局部坐标系, x 轴平行于裂纹面, y 轴垂直于裂纹面. 然后在裂纹面上定义一个路径, 第一点必须是裂纹尖端节点, 路径还需要另外 4 个点, 如图 5 所示. 调用 KCALC 命令计算此路径的 K_{Is} .

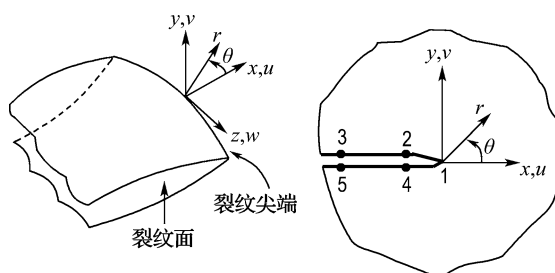


图 5 裂纹尖端坐标系和基本路径
Fig. 5 Crack tip coordinate systems and typical path

求解 p 和 m 采用停机点法, 即将有限元计算的停机点或发散前最后一个稳定收敛点对应的荷载作为结构的塑性极限荷载, 采用 Full Newton-Raphson 方法求解非线性方程组, 荷载增量加载, 荷载步尽可能小, 打开自动时间步, 以便程序能及时调整荷载子步长, 为模拟过程中几何非线性行为, 打开大变形选项.

2 K_{Is} 、 p 和 m 计算结果

2.1 结构参数量纲一化

为使计算结果具有通用性, 将接管管径比 d_o/d_i 、容器管径比 D_o/D_i 和接管与容器管径比 d_i/D_i 作为量纲一参数, 当裂纹开口长度 $\alpha=6^\circ$, 以上 3 个量不变时, 不论 D_i 如何变化, K_{Is} 、 p 和 m 都不变(见表 1).

2.2 K_{Is} 的计算

表 2 中给出不同 α 、 d_o/d_i 、 D_o/D_i 和 d_i/D_i 下接管受内压($P=1$ MPa)和弯矩($M=10$ kN·m)联合作用下的 K_{Is} 值以及内压($P=1$ MPa)、弯矩($M=10$ kN·m)单独作用下的 K_{Ip} 、 K_{Im} 值. 其中 K_{Is} 、 K_{Ip} 、 K_{Im} 值由 ANSYS 模拟得到, $K_{Ip} + K_{Im}$ 为直接加和.

表 1 D_i 与 K_{Is} 、 p 和 m 的关系
Tab.1 Relationship between D_i and K_{Is} , p , m

d_o/d_i	D_o/D_i	d_i/D_i	$K_{Is}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$		p/MPa		$m/(\text{kN} \cdot \text{m})$	
			$D_i=10 \text{ mm}$	$D_i=100 \text{ mm}$	$D_i=10 \text{ mm}$	$D_i=100 \text{ mm}$	$D_i=10 \text{ mm}$	$D_i=100 \text{ mm}$
1.01	1.01	0.5	21.913	21.913	0.183	0.183	6.573	6.573
1.02	1.01	0.5	17.786	17.786	0.651	0.651	17.364	17.364
1.01	1.02	0.5	10.654	10.654	0.384	0.384	8.682	8.682
1.01	1.01	0.3	7.255	7.255	0.704	0.704	4.288	4.288

表 2 K_{Is} 与 K_{Ip} 、 K_{Im} 的关系
Tab.2 Relationship between K_{Is} and K_{Ip} , K_{Im}

$\alpha/(\circ)$	d_o/d_i	D_o/D_i	d_i/D_i	$K_{Is}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_{Ip}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_{Im}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_{Ip} + K_{Im}$	偏差/%
6	1.01	1.01	0.5	29.329	21.779	8.51	30.289	-3.27
6	1.02	1.01	0.5	23.605	17.392	6.56	23.952	-1.47
6	1.01	1.02	0.5	12.378	10.704	1.96	12.664	-2.31
6	1.01	1.01	0.3	13.602	6.874	7.40	14.274	-4.94
12	1.01	1.01	0.5	81.045	63.934	20.47	84.404	-4.14
18	1.01	1.01	0.5	145.957	103.535	35.68	139.215	4.62
24	1.01	1.01	0.5	189.659	133.037	48.34	181.377	4.37

由表 2 可看出,在 $\alpha(6^\circ \sim 24^\circ)$ 、 d_o/d_i 、 D_o/D_i 和 d_i/D_i 不变的情况下,在 $P=1 \text{ MPa}$, $M=10 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 下, K_{Is} 与 $K_{Ip} + K_{Im}$ 偏差不大,两者偏差 $(K_{Is} - K_{Ip} - K_{Im})/K_{Is}$ 介于 $-5\% \sim +5\%$. 即在裂纹开口长度小于 24° 时,受内压和弯矩联合作用下的应力强度因子 K_{Is} 为仅受内压下应力强度因子与仅受弯矩下应力强度因子线性相加.

在线弹性条件下,在内压单独作用时, K_{Ip} 符合 $K_{Ip} = Y\sigma \sqrt{\pi a}$, 式中 K_{Ip} 与应力 σ 呈线性关系,而 σ 与 P 也呈线性关系,因此 P 与 K_{Ip} 呈线性关系. 同理 M 与 K_{Im} 呈线性关系. 因此在不同的 P 或 M 下,只要在 1 MPa 时的 K_{Ip} 乘以一个系数 P (单位 MPa)、在 $1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 时的 K_{Im} 乘以一个系数 M (单位 $\text{kN} \cdot \text{m}$) 即可求出分别在 P 或 M 下的应力强度因子.

因此受内压和弯矩联合作用下的应力强度因子 K_{Is} 计算如下:

$$K_{Is} = P \cdot K_{Ip} + M \cdot K_{Im} \tag{1}$$

2.3 极限荷载计算

图 6 中给出 $\alpha=6^\circ$, $d_o/d_i=1.02$, $D_o/D_i=1.02$ 和 $d_i/D_i=0.5$, 内压和弯矩联合作用下极限荷载数值. 图中各点为在不同内压下,接管所承受极限弯矩的值;同时也是在不同弯矩下,接管所承受极限内压的值.

图 6 中 A 点为仅受内压下接管极限内压值 p_A , B 点为仅受弯矩下接管极限弯矩值 m_B . 从图 6 中可以看出,所有达到极限时的数值均在以 A、B

两点连线的上方. 为使结论方便实际应用,认定在直线 AB 下方为未达到极限的情况,在直线 AB 上方为超过极限的情况.

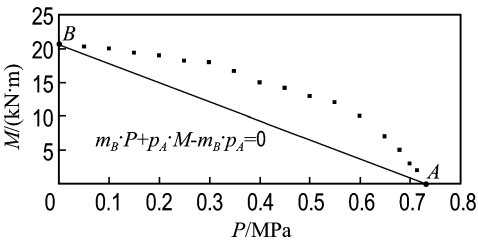


图 6 极限荷载数值

Fig. 6 Numerical value of limit load

利用不同参数 (α 、 d_o/d_i 、 D_o/D_i 和 d_i/D_i) 的接管可求出仅受内压时极限内压值 p_A 和仅受弯矩时极限弯矩值 m_B , 并建立如图 6 的弯矩 - 内压直线, 直线端点 A 坐标为 $(p_A, 0)$, 端点 B 坐标为 $(0, m_B)$. 直线 AB 可为承受内压和弯矩联合作用下接管是否达到极限状态的判定线. 直线 AB 上的点表示接管达到极限状态时接管所能承受的最大外荷载. 因此将直线 AB 命名为极限荷载线, 显然直线方程为

$$m_B \cdot P + p_A \cdot M - m_B \cdot p_A = 0 \tag{2}$$

当 $m_B \cdot P + p_A \cdot M - m_B \cdot p_A \leq 0$ 时认为接管未达到极限状态, 反之接管则因达到极限状态而失效. 极限荷载线由接管几何参数, 即 α 、 d_o/d_i 、 D_o/D_i 和 d_i/D_i 确定. 对于同一参数接管极限荷载线是不变的, 对于不同参数接管极限荷载线改变.

3 K_r 、 L_r 的确定

3.1 K_r 的确定

在内压与弯矩联合作用下的断裂比 K_r 的计算方法显然为

$$K_r = K_{Is}/K_p + \rho \quad (3)$$

式中: K_p 为考虑了安全系数后, 以应力强度因子表示的材料断裂韧性; ρ 为计算二次应力的塑性修正因子.

K_p 、 ρ 求法见 GB/T 19624—2004 中 5.7.5.

3.2 L_r 的确定

如果在内压和弯矩联合作用下接管肩部裂纹附近应力与外荷载呈线性关系, 那么, 在 M/P 不变的情况下, 将内压 P 和弯矩 M 改变相同的倍数, 接管的应力也改变等值的倍数. 结构在弹性阶段, 在内压或者弯矩作用下, 接管肩部裂纹附近的应力与外荷载呈线性关系; 在塑性阶段, 不呈线性关系. 为了满足上述线性关系, 假设在塑性阶段, 应力与外荷载也呈线性关系, 此种假设所用应力比实际应力大, 所得结论偏于保守. 尽管此假设所得结果与真实值有一定偏差, 但这样计算便于工程评定. 基于此假设, 在 M/P 不变的情况下 (即 M 和 P 呈线性关系), 在 M 和 P 组合作用下接管应力与 M 、 P 分别都呈线性关系.

在 $M/P = \zeta$, ζ 不变的条件下, 可在图 6 作出不同斜率 ζ 下的荷载变化线. 图 7 给出 $M/P = \zeta_1$ 、 ζ_2 、 ζ_3 下荷载变化线以及极限荷载线.

如图 7 所示, 以荷载变化线 $OCDE$ 为例, $OCDE$ 显示缺陷接管在 $M/P = \zeta_2$ 下荷载逐渐增大时的失效过程. 在此定义 ζ 为弯矩和内压组合比, 简称组合比. 将由组合比 ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 确定的这类直线定义为组合比线. 显然, 不同的组合比 ζ 对应的组合比线不同.

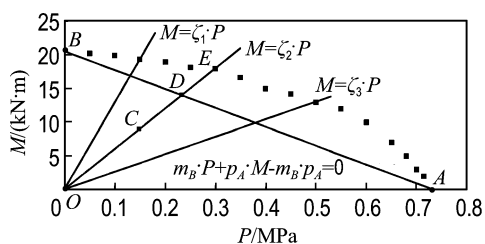


图 7 内压和弯矩组合比

Fig. 7 Combined ratio of internal pressure and bending moment

图 8 中 C 点为组合比 ζ_2 下接管受某一种外载的状态, D 点为在组合比 ζ_2 下接管极限荷载按式 (2) 的计算值, E 点为在组合比 ζ_2 下接管极限荷

载的模拟值. 由于 E 点位置受接管几何参数的影响, 还难以确定给出. 以 D 点作为塑性屈服极限荷载, 便于评定且评定结果偏于安全. 同时 D 点值可由接管的极限荷载线和组合比线相交求出.

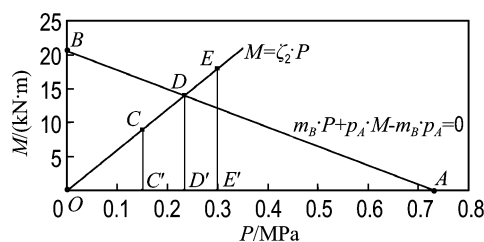


图 8 内压和弯矩组合比 (以 ζ_2 为例)

Fig. 8 Combined ratio of internal pressure and bending moment (to ζ_2 , for example)

故 L_r 可由 OC 的长度除以 OD 的长度求出. 如图 8 所示, 显然

$$L_r = \frac{\overline{OC}}{\overline{OD}} = \frac{\overline{OC'}}{\overline{OD'}} \quad (4)$$

其中 $\overline{OC'}$ 为接管实际受到内压值 P ; $\overline{OD'}$ 为由 ζ 求出的接管受到组合外载下极限内压值.

由数学知识易知

$$\overline{OD'} = \frac{m_B \cdot p_A}{m_B + \zeta \cdot p_A} \quad (5)$$

则 L_r 计算式为

$$L_r = \frac{\overline{OC'}}{\overline{OD'}} = P / \left(\frac{m_B \cdot p_A}{m_B + \zeta \cdot p_A} \right) = P \cdot \frac{m_B + \zeta \cdot p_A}{m_B \cdot p_A} \quad (6)$$

4 内压和弯矩联合作用下接管安全评定

内压和弯矩联合作用下含肩部穿透裂纹接管的安全评定步骤如下:

(1) 根据实际情况得到实际内压 P 和弯矩 M , 并计算出 a 、 d_o/d_i 、 D_o/D_i 和 d_i/D_i ;

(2) 由 a 、 d_o/d_i 、 D_o/D_i 和 d_i/D_i 查出 1 MPa 下 K_{Ip} 、1 kN·m 下 K_{Im} (可在文献[8]中查出);

(3) $K_{Is} = P \cdot K_{Ip} + M \cdot K_{Im}$ (P 单位为 MPa, M 单位为 kN·m);

(4) $K_r = K_{Is}/K_p + \rho$;

(5) 由 a 、 d_o/d_i 、 D_o/D_i 和 d_i/D_i 查出 p_A 、 m_B (可在文献[8]中查出);

(6) $L_r = P \cdot \frac{m_B + \zeta \cdot p_A}{m_B \cdot p_A}$ ($\zeta = M/P$);

(7) 由 K_r 、 L_r , 使用失效评定图, 对在内压和弯矩联合作用下的接管进行安全评定.

5 结 论

(1) 受内压和弯矩联合作用下接管应力强度因子 $K_{Is} = P \cdot K_{Ip} + M \cdot K_{Im}$, 即为仅受内压下应力强度因子与仅受弯矩下应力强度因子的线性加和;

(2) 受内压和弯矩联合作用下接管极限荷载符合方程 $m_B \cdot P + p_A \cdot M - m_B \cdot p_A = 0$;

(3) 给出了在内压和弯矩联合作用下接管断裂比和极限荷载比的计算方法;

(4) 给出了内压和弯矩联合作用下含肩部穿透裂纹接管安全评定的步骤。

参考文献:

- [1] 国家质检总局办公厅. 2008 年全国特种设备安全状况[R]. 北京: 国家质检总局, 2009.
The General Office of the State Quality Inspection Administration. In 2008 the national security of special type equipment status [R]. Beijing: State Quality Inspection Administration, 2009. (in Chinese)
- [2] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19624—2004 在用含缺陷压力容器安全评定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004
China National Standardization Management Committee. GB/T 19624-2004 Safety Assessment for In-service Pressure Vessels Containing Defects [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. (in Chinese)
- [3] Chattopdhyay J, Dutta B K, Kushwaha H S, *et al.* Limit load analysis and safety assessment of an elbow with a circumferential crack under a bending moment [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1995, **62**(2):109-116.
- [4] BAI Yong, SONG Ru-xin. Fracture assessment of dented pipes with cracks and reliability-based calibration of safety factor [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1997, **74**(3):221-229.
- [5] Brickstad B, Bergman M, Andersson P, *et al.* Procedures used in Sweden for safety assessment of components with cracks [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2000, **77**(14-15):877-881.
- [6] Lee Chang-min. Assessment of radiological safety of Wolsung site at site boundary considering crack impact [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2010, **52**(4):374-378.
- [7] 轩福贞, 刘长军, 李培宁. 含环向裂纹等径焊制三通极限压力(I)——有限元分析[J]. 石油化工设备, 2001, **30**(4):16-20.
XUAN Fu-zhen, LIU Chang-jun, LI Pei-ning. Limit pressure for equal-diameter welded pipe branch junctions containing circumferential cracks part (I) — finite element analysis [J]. *Petro-chemical Equipment*, 2001, **30**(4):16-20. (in Chinese)
- [8] 董 硕. 含肩部穿透裂纹接管安全评定[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
DONG Shuo. Safety assessment for nozzle containing through-wall crack at the shoulder [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)

Safety assessment for nozzle containing through-wall crack under multiple loads

YU Jian-liang^{*1}, DONG Shuo^{1,2}, YAN Xing-qing¹, LIU Ming¹

(1. School of Chemical Machinery, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. China Textile Industrial Engineering Institute, Beijing 100037, China)

Abstract: There are still no reliable approaches to safety assessment on pressure vessels containing defects under multiple loads now. The 3D finite element method was adopted to calculate fracture ratio and load ratio used in safety assessment for nozzle containing through-wall crack at the shoulder under the combination of internal pressure and moment. Research results indicate that fracture ratio can be obtained by the stress intensity factor K_{Is} of crack under internal pressure and moment, which is the summation of stress intensity factor of crack under internal pressure and that under moment. Load ratio can be obtained by actual external loads, limit internal pressure p and limit moment m , and the relation between p and m fits the linearity equation. Therefore, safety assessment of nozzle containing through-wall crack at the shoulder under internal pressure and moment can be accomplished.

Key words: safety assessment; through-wall crack; fracture ratio; load ratio; stress intensity factor; limit load