

文章编号:1008-1534(2025)02-0182-07

含表面裂纹储罐应力强度因子分析

焦亮杰¹, 刘庆刚¹, 赵泽楠¹, 段志祥²

(1. 河北科技大学机械工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029)

摘要:为防止含缺陷在役储罐发生安全事故、提高其安全性,对含裂纹缺陷储罐不同尺寸和不同位置裂纹的应力强度因子进行研究。以承受内压作用的含表面半椭圆裂纹储罐为研究对象,利用相互作用积分法研究了不同裂纹长度(c)、裂纹深度(a)与储罐厚度(t)比值 a/t 、裂纹所处位置因素对裂纹尖端应力强度因子最大值 $K_{I,max}$ 数值的影响。结果表明:裂纹处于筒体位置时, $K_{I,max}$ 随着裂纹长度和裂纹深度与储罐厚度比值的增大而增长,且增长速率不固定;裂纹处于椭圆形封头时, $K_{I,max}$ 随裂纹面几何中心与椭圆封头中心连线与椭圆封头长轴夹角 θ 的增大而减小,随裂纹长度的增加而增大;裂纹处于开孔附近高应力区时, $K_{I,max}$ 随裂纹长度的变化规律与筒体处一致;当裂纹长度大于裂纹深度时, $K_{I,max}$ 出现在裂纹前缘中间部位,反之出现在裂纹前缘两端。研究结果对于在役含缺陷储罐及其他压力容器安全评价以及检验规则的制定具有一定的参考意义。

关键词:断裂力学;应力强度因子;有限元分析;压力储罐;表面半椭圆裂纹

中图分类号: TH123 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7535/hbgykj.2025yx02010

Stress intensity factor analysis of storage tanks with surface cracks

JIAO Liangjie¹, LIU Qinggang¹, ZHAO Zenan¹, DUAN Zhixiang²

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: To prevent safety accidents and improve the safety of in-service storage tanks with defects, the stress intensity factors of cracks of different sizes and locations in tanks with crack defects were studied. Taking the storage tank with a semi-elliptic surface crack under internal pressure as the research object, the influence of different crack length c , the ratio of crack depth to tank thickness (a/t), and the location of the crack on the maximum value $K_{I,max}$ of the stress intensity factor at the crack tip was studied by using the interaction integration method. The results show that when the crack is located in the cylinder, $K_{I,max}$ increases with the increase of crack length and the ratio of crack depth to tank thickness, and the growth rate is not fixed; When the crack is located in the elliptical head, $K_{I,max}$ decreases with the increase of the angle θ between the geometric center of the crack surface and the connecting line of the elliptical head center and the long axis of the elliptical head, and increases with the increase of the crack length; When the crack is located in the high stress area near the opening, the change rule of $K_{I,max}$ with the crack length is consistent with that of the cylinder; When the crack length is greater than the

收稿日期:2024-06-20;修回日期:2025-01-19;责任编辑:王淑霞

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1506205)

第一作者简介:焦亮杰(1999—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要从事过程装备结构优化与强度分析方面的研究。

通信作者:刘庆刚教授。E-mail:qgliu81@163.com

焦亮杰,刘庆刚,赵泽楠,等.含表面裂纹储罐应力强度因子分析[J].河北工业科技,2025,42(2):182-188.

JIAO Liangjie, LIU Qinggang, ZHAO Zenan, et al. Stress intensity factor analysis of storage tanks with surface cracks[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2025, 42(2): 182-188.

crack depth, $K_{I,max}$ appears in the middle of the crack leading edge, and vice versa. The research results have a certain reference significance for the safety evaluation and inspection rules of in-service defective storage tanks and other pressure vessels.

Keywords: fracture mechanics; stress intensity factor; finite element analysis; pressure storage tank; semi-elliptical surface crack

储罐应用范围较广,在役储罐面临的工况复杂多样,服役过程中易产生不同类型的裂纹缺陷。其中,介质腐蚀、蠕变腐蚀、疲劳腐蚀、过冷过热等均可能导致储罐形成裂纹缺陷,从而降低其使用寿命,使其存在安全隐患,因此需要分析含裂纹储罐的极限状态,从而预防安全事故,提高储罐的工作效率和安全性^[1-3]。要了解含缺陷罐体在承受内压状况下的应力分布情况,就需要研究应力强度因子。YANG 等^[4]分析了多裂纹应力强度因子中的含多裂纹的塑性区融合问题,发现可以对含有多个裂纹(弹性裂纹或塑性裂纹)材料的疲劳断裂行为分析进行简化,针对不同的多裂纹问题选择不同的影响区域。BOZKURT 等^[5]分析了压力容器与径向接管交接处角裂纹的应力强度因子,结合圆形和椭圆形裂纹混合模式应力强度因子(stress intensity factor, SIF)计算,探究了角裂纹的角度和尺寸变化对应力强度因子的影响,得到内压和各种外载荷作用下的角裂纹应力强度因子参数。PERL 等^[6]应用新颖的考虑包辛格效应的自增强残余应力场方法,分析了球形压力容器内孔环向裂纹在内压和自增强作用下的应力强度因子,结果表明,利用自增强处理方法可延缓裂纹萌生和扩展的速率,延长疲劳寿命。TORIBIO^[7]利用虚拟裂纹扩展技术计算出能量释放率,分析螺母载荷与拉伸作用下螺栓半椭圆表面裂纹的应力强度因子,得到了一种利于处理螺纹连接处裂纹问题的解决方案。针对压力容器的裂纹问题,根据具体情况采用相应的处理方法,由于工况、技术水平、材料差异等问题,实际测量和预估裂纹缺陷时较为困难。这需要结合相关数据、规范和技术经验等手段,根据实测裂纹尺寸与容器壁厚之间的关系,确定简化成的裂纹类型及尺寸,再进行系统的评估。裂纹产生的角度和尺寸是不可控的,且工程上也常出现不同于轴向的裂纹角度,初始角度的不同对储罐的影响不同^[8]。裂纹所处环境、所处位置、所受工况及残余应力类型对裂纹的扩展方向、疲劳寿命也有较大的影响^[9-11]。综上所述,如何确定不同裂纹位置及尺寸对储罐的具体影响,保障设备安全使用 and 实现使用率最大化尤为重要。

本文采用 ANSYS 有限元分析软件,以含半椭圆表面裂纹缺陷储罐为例,研究不同裂纹位置、裂纹

长度、裂纹深度对储罐造成的应力强度因子的变化情况,为工程实践提供更加可靠的预测和控制手段,并为后续的安全评估提供参考。

1 应力强度因子计算

应力强度因子可作为裂纹尖端应力应变场强度的参量,由 IRWIN 在 1957 年正式定义,可用于表征裂纹尖端区的应力、应变、应变能密度及位移。确定应力强度因子的方法有很多,如常用的解析法、实验法、数值法。解析法和实验法都具有局限性,解析法单纯运用公式和定理求解问题,实验法需要适宜的设备及使用条件,而数值法由于不受几何结构和载荷情况限制的特点,在现代断裂力学中起到重要作用^[12]。数值法广泛应用于复杂问题的求解,具有良好的准确性。裂纹在力学特征上分为张开(I型)、滑移(II型)和撕开(III型)3类^[13]。由于 I 型裂纹最为危险,因此研究 I 型裂纹应力强度因子最大值 $K_{I,max}$ 的分布规律,在工程上能够有效保障含缺陷储罐的安全性。

1.1 应力强度因子模拟法

应力强度因子模拟法采用相互作用积分法进行计算,当使用相互作用积分法计算应力强度因子时,是用体积分来进行获取应力强度因子,通过建立裂纹尖端的辅助场来分离并获取真实场中的 I 型和 II 型应力强度因子^[14]。相互作用积分法是在 Rice 提出的 J 积分基础上进行优化,使其适应范围更广,其 J 积分的定义如下^[15]。

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right), \quad (1)$$

式中: W 为应变能密度; T 为积分边界上的作用力; u 为边界上位移; s 为弧长; Γ 为围绕裂纹尖端的逆时针积分回路; x, y 分别为以裂纹尖端为坐标原点平行和垂直裂纹面的坐标; W, T 定义如下。

$$W = \frac{1}{2} \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}, \quad (2)$$

$$T = \sigma_{ij} n_i, \quad (3)$$

式中: ϵ_{ij} 为裂纹尖端的应变; σ_{ij} 为 ϵ_{ij} 的应力参数; n_i 为积分回路的单元外法向向量。

为了分离应力强度因子 K_I 和 K_{II} ,假设承受真实载荷和辅助载荷的共同作用,因为辅助载荷下

的辅助场(σ_{ij}^{aux} 、 ϵ_{ij}^{aux} 、 u_{ij}^{aux})也是满足平衡条件和物理方程的位移场和应力场,即得到辅助场的积分公式,如式(4)所示:

$$J^{aux} = \int_{\Gamma} \left(\frac{1}{2} W^{aux} \delta_{ij} - \sigma_{ij}^{aux} \frac{\partial u_i^{aux}}{\partial x_i} n_i d\Gamma \right) \quad (4)$$

利用叠加原理并联立式(1)–(4),得复合场共同作用的积分公式,如式(5)所示:

$$J^* = \int_{\Gamma} \left[\frac{1}{2} (\sigma_{ij} + \sigma_{ij}^{aux}) (\epsilon_{ij} + \epsilon_{ij}^{aux}) \delta_{ij} - (\sigma_{ij} + \sigma_{ij}^{aux}) \left(\frac{\partial (u_i + u_i^{aux})}{\partial x_i} \right) n_i d\Gamma \right] \quad (5)$$

根据各向同性材料的 J 积分与应力强度因子的关系得到式(6)。

$$J = \frac{1}{E^*} (K_I^2 + K_{II}^2) \quad (6)$$

式中: E^* 为等效模量,当 $E^* = E$ 时表示平面应力,当 $E^* = E/(1-\nu^2)$ 时表示平面应变,其中 E 为材料弹性模量; ν 为材料泊松比。因此复合场共同作用的积分可表示为式(7)。

$$J^* = \frac{1}{E^*} [(K_I + K_I^{aux})^2 + (K_{II} + K_{II}^{aux})^2] \quad (7)$$

$$f_m^A = \frac{1}{\left[1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \right]^{0.5}} \left\{ \begin{array}{l} 1.13 - 0.09 \frac{a}{c} + \left[-0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{c}} \right] \left(\frac{a}{t} \right)^2 + \\ \left[0.5 - \frac{1}{0.65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{24} \right] \left(\frac{a}{t} \right)^4 \end{array} \right\} \quad (13)$$

$$f_b^A = \left\{ 1 + \left(-1.22 - 0.12 \frac{a}{c} \right) \frac{a}{t} + \left[0.55 - 1.05 \left(\frac{a}{c} \right)^{0.75} + 0.47 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.5} \right] \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right\} f_m^A \quad (14)$$

$$f_m^B = \left\{ \left[1.1 + 0.35 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right] \left(\frac{a}{c} \right)^{0.5} \right\} f_m^A \quad (15)$$

$$f_b^B = \left[1 - 0.34 \frac{a}{t} - 0.11 a^2 / (ct) \right] f_m^B \quad (16)$$

式中: f_m^A 、 f_b^A 为求裂纹深度 K_I 处时所用系数; f_m^B 、 f_b^B 为求裂纹长度方向两端 K_I 处时所用系数,其中深度处的系数与长度处的系数所求取的位置在裂纹表征下如图1所示的点A、点B处,并且以下这2点位置所得的应力强度因子分别称为 $K_{I,A}$ 和 $K_{I,B}$ 。

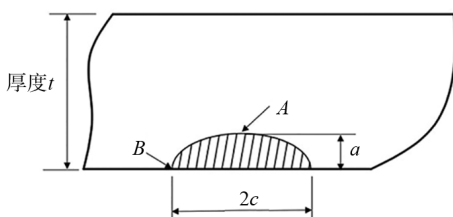


图1 裂纹表征

Fig. 1 Characterization of crack

$$J^* = J + J^{aux} + I \quad (8)$$

其中, I 为相互作用积分,联合式(6)–(8)得I型、II型应力强度因子与相互作用积分之间关系,如式(9)所示:

$$I = \frac{2}{E^*} (K_I K_I^{aux} + K_{II} K_{II}^{aux}) \quad (9)$$

辅助场中取 $K_I = 1, K_{II} = 0$ 或 $K_I = 0, K_{II} = 1$,得到实际场的I, II型应力强度因子 K_I, K_{II} 。

$$K_I = \frac{E^*}{2} I_1 \quad (10)$$

$$K_{II} = \frac{E^*}{2} I_2 \quad (11)$$

1.2 应力强度因子理论值计算法

根据GB/T 19624—2019《在用含缺陷压力容器安全评定》^[16]要求,得到半椭圆表面裂纹轴向时的 K_I 计算公式,如式(12)所示。

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_m f_m + \sigma_b f_b) \quad (12)$$

式中: σ_m 为薄膜应力,MPa; f_m 为薄膜应力强度因子系数; σ_b 为弯曲应力,MPa; f_b 为弯曲应力强度因子系数; a 为裂纹短半轴。其中:

2 物理模型及可靠性验证

2.1 物理模型的建立

传统的储罐结构较为复杂,分析中为了提高计算效率,对圆筒形储罐模型进行了简化,省略了对分析结果影响较小的扶梯、安全阀、加强圈等附件^[17],储罐原始及简化后的模型如图2所示。

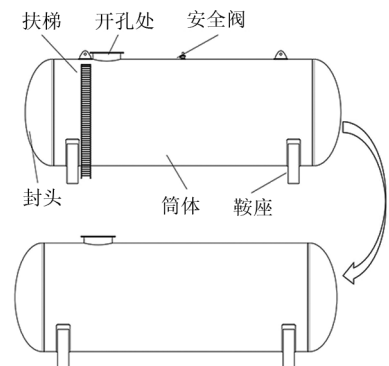


图2 储罐原始及简化模型

Fig. 2 Original and simplified models of storage tanks

模型参数为壁厚 $t=6\text{ mm}$, 外径 $D_0=2\ 412\text{ mm}$, 筒体长 $l=5\ 850\text{ mm}$, 采用标准椭圆形封头。由于模型的外直径 D_0 与内直径 D_i 之比小于 1.1, 因此该储罐视为薄壁圆筒结构^[18]。储罐模型的材料选取为 Q345R, 弹性模量 $E=201\text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.3$, 屈服强度 $R_{eL}=315\text{ MPa}$ 。有限元模型的载荷在筒体表面施加内压力为 0.5 MPa , 边界条件为在鞍座底部施加固定支撑约束。

根据 GB/T 19624—2019《在用含缺陷压力容器安全评定》^[16] 要求, 并结合沿壳体表面方向的实测最大裂纹长度与实测裂纹深度之间的关系, 分别规划为半椭圆型裂纹和半圆型裂纹。本文裂纹尺寸均符合规划为半椭圆裂纹的要求, 因此基于储罐不同位置的内表面设置了半椭圆型裂纹, 裂纹面始终垂直壁厚方向, 设置了不同裂纹深度(a)和裂纹长度(c)值。将模型沿轴向 Y 剖分为 $1/2$ 进行观测, 如图 3 所示, 其中 X 为径向方向, Y 为轴向方向, Z 为垂直于轴向的法向方向。选取的裂纹在筒体中心处的局部单元示意图如图 4 所示, 即裂纹长度与筒体轴向平行, 裂纹深度与筒体壁厚垂直。裂纹位置分别设定为筒体中心位置、不同角度(θ)下的封头各个位置、高应力区位置, 其中选取 θ 分别为 30° 、 45° 和 60° , θ 值代表裂纹面几何中心与椭圆封头中心连线与椭圆封头长轴夹角。同时考虑局部应力分布情况及开孔边界的影响, 选取了开孔位置附近沿筒体轴向 Y 距开孔外径为 30 mm 处为高应力区, 如图 5 所示。

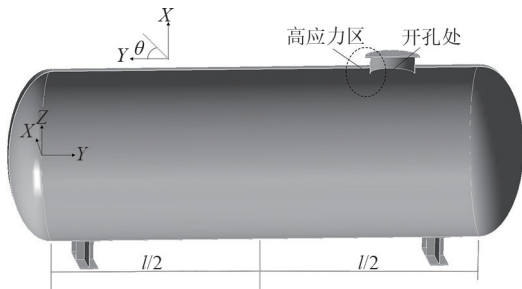


图 3 1/2 储罐模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 1/2 tank model

2.2 正确性验证

选取 $a=c=0.2t$ 的表面半椭圆裂纹参数进行模拟, 同时为了保证准确性, 需要对模型的裂纹处进行网格加密, 因此采用局部影响球加密方法, 即在裂纹处施加 16 条圆周分割轮廓网格, 6 条绕线积分条数, 裂纹周围影响区域设置为 Solid186 单元。该单元为三维 20 节点的楔形单元, 同时为消除裂纹尖端应力奇异性, 需要在其尖端位置设置 $1/4$ 节点的网格划分方式, 其他区域设置为 Solid187 的四面体网格单元。裂纹位置及网格如图 6 所示。

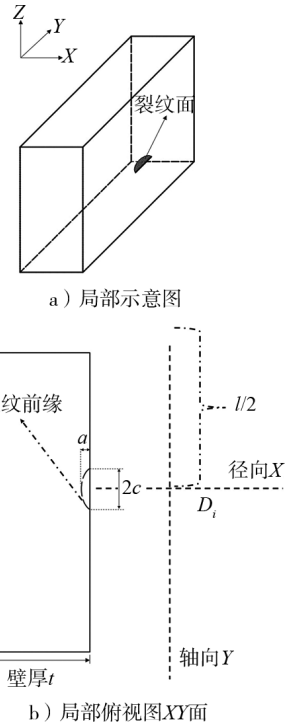


图 4 筒体中心裂纹位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cylinder center crack position

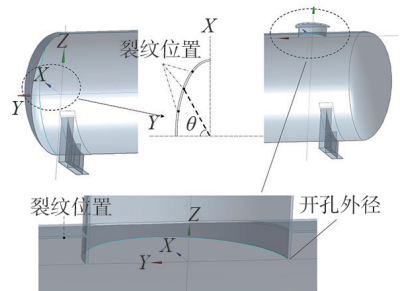


图 5 封头及高应力区的裂纹位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of crack location of head and high stress area

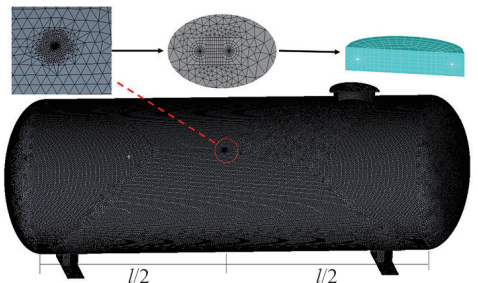


图 6 裂纹位置及网格示意图

Fig. 6 Schematic diagram of crack location and meshing

根据无力距理论, 当裂纹面垂直于壁厚时, 裂纹处薄膜应力 σ_m 与周向应力 σ_θ 相等, 如式 (17) 所示。

$$\sigma_m = \sigma_\theta = \frac{pD_0}{2t}, \quad (17)$$

式中: σ_θ 为周向应力, MPa; p 为压强, MPa; t 为壁

厚,mm。

由于薄壁圆筒结构,结合无力矩理论可知,弯曲应力 σ_b 取值为0,接着通过式(12)~(16)得到上述1.2节中图1所示位置的应力强度因子 $K_{I,A}$ 解析解(理论值),与文中1.1所述模拟出的有限元解(模拟值)进行对比,从而判断模拟的正确性。模拟了不同参数下的应力强度因子,对比结果如表1所示。由表1可知,裂纹前缘模拟值和理论值误差小于10%,符合工程要求,证明了模拟方法的可行性。

表1 2种求解方式下 $K_{I,A}$ 的对比结果

Tab.1 Comparative error results for two solutions of $K_{I,A}$

a/t	c/mm	模拟值/ ($MPa \cdot mm^{0.5}$)	理论值/ ($MPa \cdot mm^{0.5}$)	误差/%
0.2	1.2	128.92	130.232	1.01
	2.4	173.08	179.406	3.53
	4.8	196.39	211.886	7.31
	7.2	217.86	223.714	2.62
	9.6	225.83	229.953	1.79
	12.0	231.70	233.911	0.95

3 结果分析

3.1 裂纹长度对应力强度因子最大值 $K_{I,max}$ 的影响分析

设置裂纹长度 c 值为 $a, 2a, 4a, 6a, 8a, 10a$, 其中 a 为 $(0.2 \sim 0.4)t$, 得到应力强度因子 $K_{I,max}$ 模拟结果如图7所示。由图7可知 $K_{I,max}$ 值随着裂纹长度 c 的增长而增大,其中随裂纹长度增大,各尺寸间的增长速率趋势并不稳定,不同裂纹尺寸下 $K_{I,max}$ 的增长率如表2所示。

如图8可知,其中 $K_{I,A}$ 、 $K_{I,B}$ 表示图1所示A点、B点位置的应力强度因子,在 c/a 为1~2时, $K_{I,max}$ 值出现相交现象, $K_{I,max}$ 由 $K_{I,B}$ 变为 $K_{I,A}$, 即 $K_{I,max}$ 位置发生变化。当 $c/a \leq 1$ 时, $K_{I,max}$ 在裂纹前缘的两端B点,当 $c/a > 1$ 时, $K_{I,max}$ 在裂纹前缘的中部A点位置。

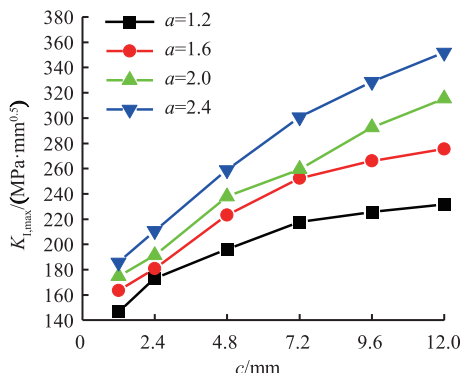


图7 裂纹长度对 $K_{I,max}$ 的影响

Fig.7 Influence of crack length on $K_{I,max}$

表2 裂纹尺寸变化对 $K_{I,max}$ 的增长比率

Tab.2 Growth rate of $K_{I,max}$ with crack size

a/mm	裂纹长度 区间	$K_{I,max}$ 增长率	a/mm	裂纹长度 区间	$K_{I,max}$ 增长率
1.2	1.2~2.4	1.18	2.0	1.2~2.4	1.09
	2.4~4.8	1.13		2.4~4.8	1.24
	4.8~7.2	1.11		4.8~7.2	1.09
	7.2~9.6	1.04		7.2~9.6	1.13
	9.6~12.0	1.03		9.6~12.0	1.08
1.6	1.2~2.4	1.11	2.4	1.2~2.4	1.14
	2.4~4.8	1.23		2.4~4.8	1.23
	4.8~7.2	1.13		4.8~7.2	1.16
	7.2~9.6	1.05		7.2~9.6	1.09
	9.6~12.0	1.04		9.6~12.0	1.07

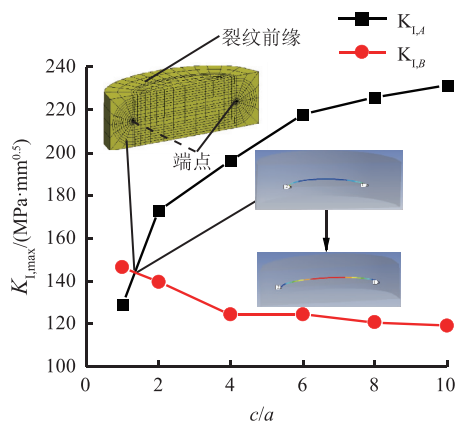


图8 $K_{I,max}$ 位置变化示意图

Fig.8 Schematic diagram of $K_{I,max}$ position change

3.2 深厚比对应力强度因子 $K_{I,max}$ 的影响分析

为了研究应力强度因子 $K_{I,max}$ 沿不同裂纹深度与筒壁厚度的比值(a/t ,简称深厚比)下的变化规律,通过3.1节中已设定的裂纹深度与厚度的比值为0.2~0.4下的数据,对裂纹深度与筒体壁厚之间的相互影响关系进行了详细分析,得到 $K_{I,max}$ 随裂纹深度变化的结果,如图9所示。由图9可看出 $K_{I,max}$ 随深厚比增大而增大,且当 c/a 变化时,仍存在 $K_{I,max}$ 位置交互现象,证明该现象不受深厚比影响。

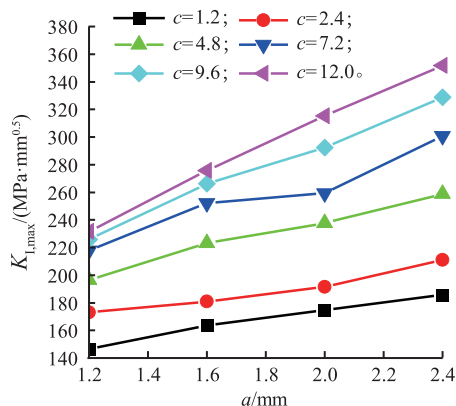


图9 裂纹深度对 $K_{I,max}$ 的影响

Fig.9 Influence of crack depth on $K_{I,max}$

3.3 裂纹位置对应力强度因子 $K_{I,max}$ 的影响分析

为探究表面半椭圆裂纹在不同位置随裂纹长度或深度变化下的应力强度分布情况,设置裂纹深度为 $a=0.2t$, 裂纹长度的设置与文中 3.1 节所述长度参数变化一致。首先进行了内、外表面位置的分析,根据薄壁圆筒的模型特性,又结合模拟分析所得发现数值极为接近,因此,内、外表面的应力强度因子可视为相同。接着为进一步探究裂纹位置因素对应力强度因子的影响,基于封头、筒体中心和高应力区位置进行探讨。在封头不同角度下的各个位置和高应力区位置预设了裂纹,各个位置的选取参数可见本文 2.1 所述。通过分析和汇总各个位置下 $K_{I,max}$ 数据,得到的封头各位置下应力强度因子最大值规律如图 10 所示,高应力区的分析结果如图 11 所示。

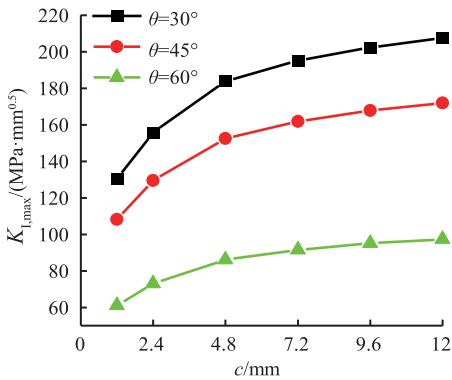


图 10 封头处裂纹长度对 $K_{I,max}$ 的影响

Fig. 10 Influence of crack length at head on $K_{I,max}$

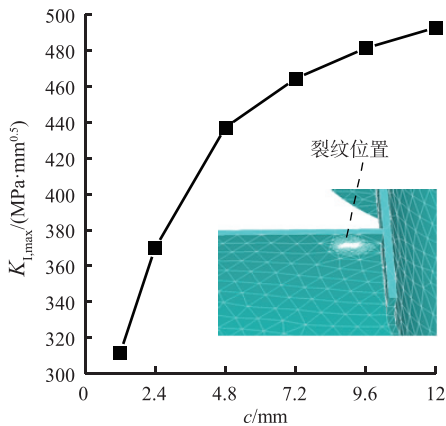


图 11 高应力区处裂纹长度对 $K_{I,max}$ 的影响

Fig. 11 Influence of crack length on $K_{I,max}$ in high stress region

随 θ 角的增大,封头位置的 $K_{I,max}$ 呈减小趋势,且封头各个位置随裂纹长度的变化与筒体处规律相同。高应力区位置的 $K_{I,max}$ 值整体较大于其他位置,并且受裂纹长度变化的影响与其他裂纹位置的 $K_{I,max}$ 变化规律一致,验证了不同裂纹位置 $K_{I,max}$ 大小与应力分布有关。

4 结 语

采用相互作用积分法分析了含表面半椭圆裂纹储罐裂纹尖端应力强度因子最大值 $K_{I,max}$ 随裂纹在储罐上位置以及裂纹几何尺寸的变化规律,主要研究结论如下。

1) 当裂纹面平行于储罐轴线方向且裂纹长度处于 $0.2t \sim 2.0t$ 时,应力强度因子最大值 $K_{I,max}$ 随裂纹长度的增大而增大。

2) 当裂纹深度处于 $0.2t \sim 0.4t$ 时, $K_{I,max}$ 随裂纹深度的增大同样呈增大趋势,并且该规律不受裂纹位置变化的影响。对比不同位置裂纹的 $K_{I,max}$ 发现,当裂纹长度一定时,高应力区裂纹尖端的 $K_{I,max}$ 最大;其次是筒体中心处;最后为封头各位置。这与内压作用下储罐的应力分布规律一致。

3) 对比封头各位置的 $K_{I,max}$ 发现, $K_{I,max}$ 随 θ 角的增大而减小; $K_{I,max}$ 出现位置与 c/a 比值有关,当 $c/a > 1$ 应力强度因子最大值 $K_{I,max}$ 位于裂纹前缘中部; $c/a \leq 1$ 时,应力强度因子最大值 $K_{I,max}$ 出现在裂纹前缘两端。 $K_{I,max}$ 出现位置随 c/a 的变化规律与裂纹在储罐上的具体位置无关。

本文未对不同温度、不同施加载荷方式、不同裂纹类型等条件下的影响情况进行探究,存在一定的局限性,后续将对含裂纹储罐在承受内压与弯矩的复合型载荷方式下的应力强度因子进行研究。

参考文献/References:

- [1] 陈飞,丁宁,王馨怡,等.基于XFEM的管道表面裂纹环向扩展数值模拟[J].材料保护,2022,55(12):47-54.
CHEN Fei, DING Ning, WANG Xinyi, et al. Numerical simulation of circumferential propagation of surface cracks on pipeline based on XFEM [J]. Materials Protection, 2022, 55 (12): 47-54.
- [2] 赵晓钧.锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题研究[J].中国设备工程,2022(6):180-181.
ZHAO Xiaojun. Research on cracks in inspection of pressure piping of boiler and pressure vessel [J]. China Plant Engineering, 2022(6): 180-181.
- [3] 刘兴林.锅炉压力容器压力管道检验中裂纹问题及处理措施分析[J].中国机械,2023(29):101-104.
LIU Xinglin. Cracks in the inspection of pressure pipes of boilers and pressure vessels and analysis of treatment measures [J]. China Machinery, 2023(29): 101-104.
- [4] YANG Hongda, SHENG Yue, ZHANG Jiding, et al. The influenced zones of stress intensity factor and plasticity at multi-crack tips [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 127: 103978.
- [5] BOZKURT M, UZZAMAN A, NASH D. Determination of mixed-mode stress intensity factors for axial crotch corner cracks at cylindrical vessel to nozzle intersections under internal

- pressure and nozzle loads[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 204:104929.
- [6] PERL M, STEINER M. The beneficial effect of full or partial autofrettage on the combined 3-D stress intensity factors for inner coplanar crack arrays and ring cracks in a spherical pressure vessel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 191: 426-440.
- [7] TORIBIO J. Review and synthesis of stress intensity factor (SIF) solutions for elliptical surface cracks in bolts under nut loading: A tribute to Agustín de Betancourt[J]. Procedia Structural Integrity, 2022, 39: 730-734.
- [8] 马东文, 余刚, 方修洋, 等. 初始圆形裂纹角度对钢轨埋藏裂纹扩展特性影响[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 959-964.
MA Dongwen, YU Gang, FANG Xiuyang, et al. Influence of initial circular crack angle on buried crack growth characteristics of rail[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 959-964.
- [9] FANG Xiuyang, ZHANG Haonan, MA Dongwen, et al. Influence of welding residual stress on subsurface fatigue crack propagation of rail[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 271:108642.
- [10] FANG Xiuyang, ZHANG Haonan, MA Dongwen. Influence of initial crack on fatigue crack propagation with mixed mode in U71Mn rail subsurface[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 136:106220.
- [11] 黄奎龙, 余刚, 方修洋, 等. 踏面匹配与初始裂纹形态交互作用下车轮多轴疲劳裂纹扩展特性[J]. 材料导报, 2024, 38(4): 187-191.
HUANG Kuilong, YU Gang, FANG Xiuyang, et al. Multiaxial fatigue crack propagation characteristics of wheel under the interaction of tread matching and initial crack morphology[J]. Materials Reports, 2024, 38(4): 187-191.
- [12] 汪必升, 李毅波, 廖雅诗, 等. 基于扩展有限元模型的动态应力强度因子计算[J]. 中国机械工程, 2019, 30(11): 1294-1301.
WANG Bisheng, LI Yibo, LIAO Yashi, et al. Calculation of dynamic stress intensity factors based on XFEM model[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(11): 1294-1301.
- [13] 李群, 欧卓成, 陈宜亨. 高等断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 16-17.
- [14] 宫经全, 张少钦, 李禾, 等. 基于相互作用积分法的应力强度因子计算[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2015(1): 42-48.
GONG Jingquan, ZHANG Shaoqin, LI He, et al. Computation of the stress intensity factor based on the interaction integral method[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2015(1): 42-48.
- [15] 李有堂, 张展涛, 杨佳. 裂纹初始角度对球形压力容器的裂纹应力强度因子与 J 积分的影响[J]. 机械设计与制造工程, 2023, 52(8): 93-97.
LI Youtang, ZHANG Zhantao, YANG Jia. The influence of the initial angle of crack on the crack stress intensity factor and J integral of spherical pressure vessel[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2023, 52(8): 93-97.
- [16] GB/T 19624—2019, 在用含缺陷压力容器安全评定[S].
- [17] 潘科, 李蕾蕾. 洪水侵袭作用下沿海化工储罐失效机制及概率研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1169-1177.
PAN Ke, LI Leilei. Failure mechanism and probability of coastal chemical storage tanks under flood attacking[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1169-1177.
- [18] 郑津洋, 桑致富. 过程设备设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 22-26.