

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2024.06.018

超高压容器开孔处裂纹最深点处应力强度因子的计算方法*

汪志福¹, 秦宗川¹, 张羽², 牛铮¹, 范海俊¹, 戴兴旺¹

(1. 合肥通用机械研究院有限公司 国家压力容器与管道安全工程技术研究中心, 安徽 合肥 230031;
2. 河南中原特钢装备制造有限公司, 河南 济源 459000)

摘要: 由于超高压容器开孔处的应力梯度变化很大, 通常由最小二乘法拟合的三次多项式往往与实际的应力分布之间存在较大偏差。针对这一问题, 提出了一种分段插值求解的计算方法。首先, 基于应力强度因子及通用权函数的理论, 推导出了常数插值、线性插值、二次插值求解的计算公式; 其次, 结合工程实例, 基于无裂纹体的弹性应力分析, 对比分析了常规最小二乘法与常数插值、线性插值、二次插值的应力分布表征精度及应力强度因子计算结果, 确定了线性插值和二次插值方法的可靠性; 然后, 分析了数据采集量对线性插值和二次插值计算结果的影响, 确定了线性插值方法的实用性; 最后, 对线性插值与有限元分析的计算结果进行了分析验证。研究结果表明: 应力分布表征精度为“最小二乘法 < 常数插值 < 线性插值 < 二次插值”, 计算结果相对误差约为 15%; 随着采集数据量的增加, 采用线性插值方法的计算结果能较快收敛, 更适合于工程计算; 线性插值与有限元法的计算结果高度一致, 证明了线性插值计算的可靠性。

关键词: 超高压容器开孔处; 应力强度因子; 通用权函数; 分段插值求解计算方法; 裂纹最深点处; 线性插值计算方法

中图分类号: TH49

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2024)06-1109-07

Calculation method of stress intensity factor at deepest point of crack at opening of ultra-high-pressure vessel

WANG Zhifu¹, QIN Zongchuan¹, ZHANG Yu², NIU Zheng¹, FAN Haijun¹, DAI Xingwang¹

(1. National Technology Research Center on Pressure Vessel and Pipeline Safety Engineering, Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd., Hefei 230031, China; 2. Henan Zhongyuan Special Steel Equipment Manufacturing Co., Ltd., Jiyuan 459000, China)

Abstract: Due to the significant variation of the stress gradient at the opening of ultra-high-pressure vessel, the cubic polynomial usually fitted by the least square method often has a large deviation from the actual stress distribution. To solve this problem, a calculation method based on piecewise interpolation was proposed. Firstly, based on the theory of stress intensity factor and general weight function, the calculation formulas were derived by constant interpolation, linear interpolation and quadratic interpolation. Secondly, combining with an engineering example, based on the elastic stress analysis of a crack free body, the calculation results of the stress distribution characterization accuracy and stress intensity factor of the conventional least square method, constant interpolation, linear interpolation and quadratic interpolation were compared and analyzed, and the reliability of the linear interpolation and quadratic interpolation methods was determined. Then, the influence of data collection on the results of linear interpolation and quadratic interpolation was analyzed, and the practicability of linear interpolation method was determined. Finally, the results of linear interpolation and finite element analysis were analyzed and verified. The results show that the representation accuracy of stress distribution is “the least square method < constant interpolation < linear interpolation < quadratic interpolation”, and the relative error of calculation results is about 15%. With the increase of the amount of collected data, the calculation results using linear interpolation method can converge faster, which is more suitable for engineering calculation. The results of linear interpolation and finite element method are highly consistent, which proves the reliability of linear interpolation calculation.

Key words: opening of ultra-high-pressure vessel; stress intensity factor; general weight function; calculation method based on piecewise interpolation; deepest point of crack; linear interpolation calculation method

收稿日期: 2023-09-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3306401, 2022YFB4003003); 国家工信部高质量发展专项(TC220A04W-3, 188)

作者简介: 汪志福(1986-), 男, 安徽合肥人, 高级工程师, 主要从事高压容器、高压管道完整性设计方面的研究。E-mail: 122713243@qq.com

0 引 言

近年来,由于超高压技术在高压气氢储运、石油化工、食品加工及国防军工等领域得到大力发展,因此,我国的超高压容器行业也得到了快速发展。超高压容器开孔处的应力集中系数很高,因此其在制造及使用运行过程中最易萌生表面裂纹,进而在交变载荷的作用下持续扩展,最终发生疲劳破坏^[1-3]。

目前,超高压容器设计的主要参考标准为 GB/T 34019《超高压容器》^[4-5]和 ASME BPVC VIII-3《高压容器建造另一规则》^[6]。两部标准都主要是基于断裂力学的理论进行疲劳分析。在其分析过程中,一个关键步骤是需要准确地计算出裂纹最深点处的应力强度因子值。高耀东等人^[7]采用 ASME 中的断裂力学分析方法,研究了初始轴向内表面裂纹尺寸对应力强度因子的影响,并指出初始裂纹深度尺寸对裂纹应力强度因子的影响要远大于其长度尺寸;但其未对复杂应力分布状态下萌生裂纹的应力强度因子进行研究。秦媛媛等人^[8]采用理论公式及有限元法,提出了平面应变内压载荷下厚壁筒内表面轴向裂纹的理论模型,研究了筒体内表面平行双轴向裂纹之间相互作用及裂纹尖端应力强度因子的影响规律,发现了双轴向裂纹之间相互影响的闭合效应和张开效应受裂纹间夹角影响;但其未提出开孔处裂纹应力强度因子的计算方法。袁舒梦等人^[9]利用 MATLAB 编写的程序,研究了 GB/T 34019 与 ASME BPVC VIII-3 在计算钢制瓶式容器筒体内壁裂纹应力强度因子中的差异,发现了对于单一的浅裂纹,使用 GB/T 34019 计算的应力强度因子更大,对于单一的深裂纹,则使用 ASME BPVC VIII-3 计算的结果更大;但其未研究筒体开孔处裂纹的应力强度因子。

由此可见,很多学者对筒体内壁裂纹的应力强度因子进行了大量的研究,但对超高压容器开孔处裂纹的应力强度因子,却很少研究。目前,针对上述问题,工程人员主要参考 GB/T 34019 与 ASME BPVC VIII-3 提出的筒体内壁轴-径向裂纹应力强度因子的计算方法进行了计算;然而,在计算过程中却发现,由于开孔处的应力梯度变换很大,衰减由快变慢,其数据通常无法用合适的三次多项式拟合。

针对这一问题,笔者提出将应力分布数据进行离散化分段插值的新思路,依据理论推导出基于常数插值、线性插值、二次插值的计算方法,针对常规最小二乘法与分段插值方法的应力分布表征精度及应力强度

因子计算结果进行对比分析,分析数据采集量对线性插值和二次插值计算结果的影响,并对线性插值计算方法的可靠性进行验证。

1 理论基础

1.1 应力强度因子

对于超高压容器开孔处裂纹,应力强度因子表达式如下:

$$K_I = \sum_{i=0}^3 A_i G_i \sqrt{\pi a/Q} \quad (1)$$

式中: a 为裂纹深度; Q 为裂纹形状系数; A_i 为三次多项式拟合系数; G_i 为应力强度因子影响系数。

1.2 应力强度因子影响系数

应力强度因子影响系数 G_i 对应于裂纹上不同参考载荷下对应的值。

针对不同分布形式的载荷 $\sigma_i(x)$, 表示如下^[10-14]:

$$\sigma_i(x) = \sigma_0 (x/a)^i \quad (2)$$

式中: i 为参考载荷的次数, $i=0,1,2,3$,分别对应均布载荷、线性载荷、二次载荷、三次载荷。

应力强度因子影响系数 G_i 表示如下:

$$G_i = \frac{K_I(\sigma_i)}{\sigma_0 \sqrt{\pi a/Q}} \quad (3)$$

式中: G_i 为在不同参考载荷类型下的影响系数。

1.3 通用权函数

BUECKNER H F^[15]和 RICE J R^[16]提出了任意载荷下计算裂纹应力强度因子的权函数法。

裂纹形式及坐标如图 1 所示。

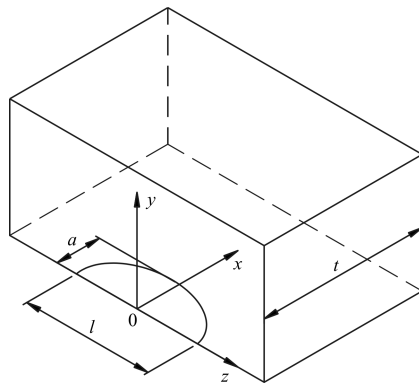


图 1 裂纹形式及坐标

Fig. 1 Forms and coordinates of cracks

K_I 可以利用裂纹体权函数 $m(x, a)$ 和无裂纹体应力 $\sigma(x)$ 乘积的积分求得, 表示如下:

$$K_I = \int_0^a m(x, a) \sigma(x) dx \quad (4)$$

GLINKA G、SHEN G 和 ZHENG X J 等人^[17-18]在二维权函数的基础上,基于叠加原理,提出了半椭圆形表面裂纹最深点处的通用权函数,表示如下:

$$m(x, a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left[1 + M_1 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_2 \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_3 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} + M_4 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^2 \right] \quad (5)$$

式中: $M_1 \sim M_4$ 为通用权函数系数。

2 分段插值计算

超高压容器开孔处的应力梯度变化很大,可将数据进行多段离散化,并进行常数插值、线性插值、二次插值和三次插值。由于三次插值过于复杂,笔者主要从常数插值、线性插值、二次插值三方面进行分析。

将应力分布数据进行分段插值时,应力强度因子表示如下:

$$K_I = K_{IM0} + K_{IM1} M_1 + K_{IM2} M_2 + K_{IM3} M_3 + K_{IM4} M_4 \quad (6)$$

式中: $K_{IM0} \sim K_{IM4}$ 为分应力强度因子; $\sigma_i(x)$ 为各段插值函数。

其中:

$$\begin{aligned} K_{IM0} &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n \int_{x_i}^{x_{i+1}} \sigma_i(x) \frac{1}{\sqrt{a-x}} dx, \\ K_{IM1} &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n \int_{x_i}^{x_{i+1}} \sigma_i(x) \frac{1}{\sqrt{a}} dx, \\ K_{IM2} &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n \int_{x_i}^{x_{i+1}} \sigma_i(x) \frac{\sqrt{a-x}}{a} dx, \\ K_{IM3} &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n \int_{x_i}^{x_{i+1}} \sigma_i(x) \frac{a-x}{a\sqrt{a}} dx, \\ K_{IM4} &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n \int_{x_i}^{x_{i+1}} \sigma_i(x) \frac{(a-x)^{3/2}}{a^2} dx \quad (7) \end{aligned}$$

2.1 常数插值

基于常数插值时,各段的插值函数表示如下:

$$\sigma_i(x) = a_{0i} \quad (i=1, \dots, n) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)中进行积分,得出的分应力强度因子表示如下:

$$\begin{aligned} K_{IM0} &= 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n [a_{0i} (\sqrt{a-x_i} - \sqrt{a-x_{i+1}})], \\ K_{IM1} &= \frac{1}{\sqrt{a}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n [a_{0i} (x_{i+1} - x_i)], \\ K_{IM2} &= \frac{2}{3a} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n [a_{0i} (a-x_i)^{3/2} - a_{0i} (a-x_{i+1})^{3/2}], \end{aligned}$$

$$K_{IM3} = \frac{1}{a\sqrt{a}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n [-a_{0i} (x_{i+1}^2 - x_i^2) + 2a_{0i} a (x_{i+1} - x_i)],$$

$$K_{IM4} = \frac{2}{5a^2} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n [a_{0i} (a-x_i)^{5/2} - a_{0i} (a-x_{i+1})^{5/2}] \quad (9)$$

式中: n 为离散化的总段数; a_{0i} 为系数; x_i, x_{i+1} 为第 $i, i+1$ 个离散点的深度; $\sigma(x_i)$ 为第 i 个离散点的应力。

其中:

$$a_{0i} = \sigma(x_i) \quad (10)$$

2.2 线性插值

线性插值时,各段的插值函数表示如下:

$$\sigma_i(x) = a_{0i} + a_{1i}x \quad (i=1, \dots, n) \quad (11)$$

将式(11)代入式(7)中进行积分,得出的分应力强度因子表示如下:

$$\begin{aligned} K_{IM0} &= \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n [(a_{1i}x_i + 2a_{1i}a_{0i} + 3a_{0i}) \sqrt{a-x_i} - (a_{1i}x_{i+1} + 2a_{1i}a_{0i} + 3a_{0i}) \sqrt{a-x_{i+1}}], \\ K_{IM1} &= \frac{1}{2\sqrt{a}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n [a_{1i} (x_{i+1}^2 - x_i^2) + 2a_{0i} (x_{i+1} - x_i)], \\ K_{IM2} &= \frac{2}{15a} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n [(3a_{1i}x_i + 2a_{1i}a + 5a_{0i}) (a-x_i)^{3/2} - (3a_{1i}x_{i+1} + 2a_{1i}a + 5a_{0i}) (a-x_{i+1})^{3/2}], \\ K_{IM3} &= \frac{1}{6a\sqrt{a}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n [-2a_{1i} (x_{i+1}^3 - x_i^3) + 3(a_{1i}a - a_{0i}) (x_{i+1}^2 - x_i^2) + 6a_{0i} a (x_{i+1} - x_i)], \\ K_{IM4} &= \frac{2}{35a^2} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n [(5a_{1i}x_i + 2a_{1i}a + 7a_{0i}) (a-x_i)^{5/2} - (5a_{1i}x_{i+1} + 2a_{1i}a + 7a_{0i}) (a-x_{i+1})^{5/2}] \quad (12) \end{aligned}$$

式中: a_{0i}, a_{1i} 为系数; $\sigma(x_{i+1})$ 为第 $i+1$ 个离散点的应力。

其中:

$$\begin{aligned} a_{0i} &= \frac{\sigma(x_i)x_{i+1} - \sigma(x_{i+1})x_i}{x_{i+1} - x_i}, \\ a_{1i} &= \frac{\sigma(x_{i+1}) - \sigma(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (13) \end{aligned}$$

2.3 二次插值

二次插值时,各段的插值函数表示如下:

$$\sigma_i(x) = a_{0i} + a_{1i}x + a_{2i}x^2 \quad (i=1, \dots, n) \quad (14)$$

将式(14)代入式(7)中进行积分,得出的分应力强度因子表示如下:

$$\begin{aligned}
 K_{IM0} &= \frac{2}{15\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^n \left[(3a_{2i}x_{2i-1}^2 + 4a_{2i}ax_{2i-1} + 5a_{1i}x_{2i-1} + 8a_{2i}a^2 + 10a_{1i}a + 15a_{0i})(a - x_{2i-1})^{1/2} \right. \\
 &\quad \left. - (3a_{2i}x_{2i+1}^2 + 4a_{2i}ax_{2i+1} + 5a_{1i}x_{2i+1} + 8a_{2i}a^2 + 10a_{1i}a + 15a_{0i})(a - x_{2i+1})^{1/2} \right], \\
 K_{IM1} &= \frac{1}{6\sqrt{a}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n [2a_{2i}(x_{2i+1}^3 - x_{2i-1}^3) + 3a_{1i}(x_{2i+1}^2 - x_{2i-1}^2) + 6a_{0i}(x_{2i+1} - x_{2i-1})], \\
 K_{IM2} &= \frac{2}{105a} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n \left[(15a_{2i}x_{2i-1}^2 + 12a_{2i}ax_{2i-1} + 21a_{1i}x_{2i-1} + 8a_{2i}a^2 + 14a_{1i}a + 35a_{0i})(a - x_{2i-1})^{3/2} \right. \\
 &\quad \left. - (15a_{2i}x_{2i+1}^2 + 12a_{2i}ax_{2i+1} + 21a_{1i}x_{2i+1} + 8a_{2i}a^2 + 14a_{1i}a + 35a_{0i})(a - x_{2i+1})^{3/2} \right], \\
 K_{IM3} &= \frac{1}{12a\sqrt{a}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^n \left[-3a_{2i}(x_{2i+1}^4 - x_{2i-1}^4) + 4(aa_{2i} - a_{1i})(x_{2i+1}^3 - x_{2i-1}^3) \right. \\
 &\quad \left. + 6(aa_{1i} - a_{0i})(x_{2i+1}^2 - x_{2i-1}^2) + 12aa_{0i}(x_{2i+1} - x_{2i-1}) \right], \\
 K_{IM4} &= \frac{2}{315a^2\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^n \left[(35a_{2i}x_{2i-1}^2 + 20a_{2i}ax_{2i-1} + 45a_{1i}x_{2i-1} + 8a_{2i}a^2 + 18a_{1i}a + 63a_{0i})(a - x_{2i-1})^{5/2} \right. \\
 &\quad \left. - (35a_{2i}x_{2i+1}^2 + 20a_{2i}ax_{2i+1} + 45a_{1i}x_{2i+1} + 8a_{2i}a^2 + 18a_{1i}a + 63a_{0i})(a - x_{2i+1})^{5/2} \right] \quad (15)
 \end{aligned}$$

式中： a_{0i}, a_{1i}, a_{2i} 为系数； $\sigma(x_{2i-1}), \sigma(x_{2i}), \sigma(x_{2i+1})$ 为第 $2i-1, 2i, 2i+1$ 个离散点的应力； $x_{2i-1}, x_{2i}, x_{2i+1}$ 为第 $2i-1, 2i, 2i+1$ 个离散点的深度。

其中：

$$\begin{aligned}
 a_{0i} &= \frac{\sigma(x_{2i-1})x_{2i}x_{2i+1}^2 + \sigma(x_{2i})x_{2i+1}x_{2i-1}^2 + \sigma(x_{2i+1})x_{2i-1}x_{2i}^2 - \sigma(x_{2i-1})x_{2i}^2x_{2i+1} - \sigma(x_{2i})x_{2i+1}^2x_{2i-1} - \sigma(x_{2i+1})x_{2i-1}^2x_{2i}}{(x_{2i-1} - x_{2i})(x_{2i} - x_{2i+1})(x_{2i+1} - x_{2i-1})}, \\
 a_{1i} &= \frac{\sigma(x_{2i-1})x_{2i}^2 + \sigma(x_{2i})x_{2i+1}^2 + \sigma(x_{2i+1})x_{2i-1}^2 - \sigma(x_{2i-1})x_{2i+1}^2 - \sigma(x_{2i})x_{2i-1}^2 - \sigma(x_{2i+1})x_{2i}^2}{(x_{2i-1} - x_{2i})(x_{2i} - x_{2i+1})(x_{2i+1} - x_{2i-1})}, \\
 a_{2i} &= \frac{\sigma(x_{2i-1})x_{2i+1} + \sigma(x_{2i})x_{2i-1} + \sigma(x_{2i+1})x_{2i} - \sigma(x_{2i-1})x_{2i} - \sigma(x_{2i})x_{2i+1} - \sigma(x_{2i+1})x_{2i-1}}{(x_{2i-1} - x_{2i})(x_{2i} - x_{2i+1})(x_{2i+1} - x_{2i-1})} \quad (16)
 \end{aligned}$$

2.4 权函数系数计算

从以上分析中可知,要得出式(6)中的 K_1 值,还需裂纹最深点处相应的权函数系数 $M_1 \sim M_4$ 。

把式(2)~式(5)关联,得出的权函数系数表示如下:

$$\begin{aligned}
 M_1 &= \frac{\pi}{\sqrt{2Q}}(-32G_0 + 384G_1 - 972G_2 + 660G_3) - \frac{512}{35}, \\
 M_2 &= \frac{\pi}{\sqrt{2Q}}\left(\frac{945}{4}G_0 - \frac{21\,735}{8}G_1 + 6\,615G_2 - \frac{17\,325}{4}G_3\right) + 54, \\
 M_3 &= \frac{\pi}{\sqrt{2Q}}(-480G_0 + 5\,280G_1 - 12\,420G_2 + 7\,920G_3) - \frac{512}{7}, \\
 M_4 &= \frac{\pi}{\sqrt{2Q}}\left(\frac{1\,155}{4}G_0 - \frac{24\,255}{8}G_1 + 6\,930G_2 - \frac{17\,325}{4}G_3\right) + 33 \quad (17)
 \end{aligned}$$

对于超高压容器的表面裂纹, $G_0 \sim G_3$ 可按 GB/T 34019 中的表 F.1 取值。

3 算例分析

某台超高压容器内压为 200 MPa,温度为常温,材质为 35CrNi3MoVR,在开孔处的截面有 1/4 圆形裂纹。开孔处结构如图 2 所示。

3.1 应力分布表征精度分析

笔者对开孔处进行弹性应力分析,并沿裂纹扩展的方向,提取出垂直于裂纹所在平面的应力分布数据。

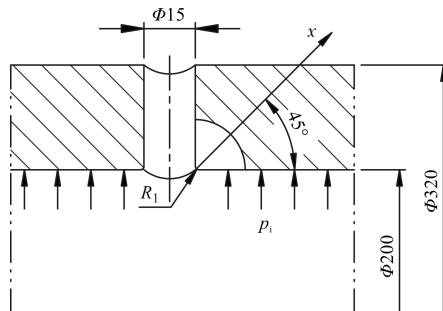
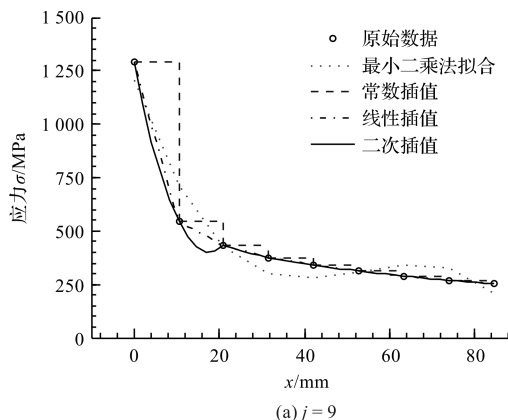


图 2 开孔处结构
Fig. 2 Structure at the opening

采用常规最小二乘法将应力分布数据进行三次多项式拟合;同时,将应力分布数据离散化,分别进行常数插值、线性插值、二次插值,采集的数据量 j 分别为 9、19、29、39。

拟合曲线和插值曲线如图 3 所示。



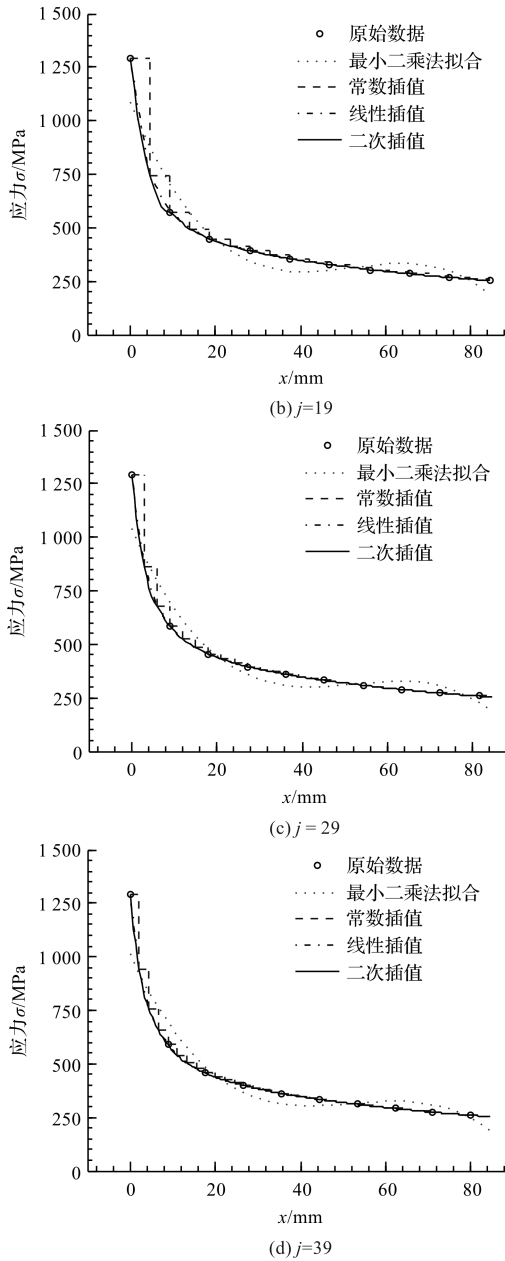


图3 拟合曲线和插值曲线

Fig. 3 Fitting curves and interpolation curves

从图3中可以明显看出:如果采用最小二乘法对应力分布数据进行三次多项式拟合,拟合出的结果与数据分布相差较大,而按笔者所述的分段插值求解,在同样多的采集数据量下,插值效果为:常数插值 < 线性插值 < 二次插值,随着采集数据的增加,线性插值逐渐逼近二次插值。

因此,与常规的最小二乘法相比,线性插值与二次插值的表征精度更高。

3.2 应力强度因子计算结果分析

按裂纹深长比为 1/2(半圆形裂纹)计算时,笔者分别用最小二乘法 and 分段插值法求解出各个裂纹深度下最深点处的应力强度因子^[19]。

应力强度因子计算结果,如图4所示。

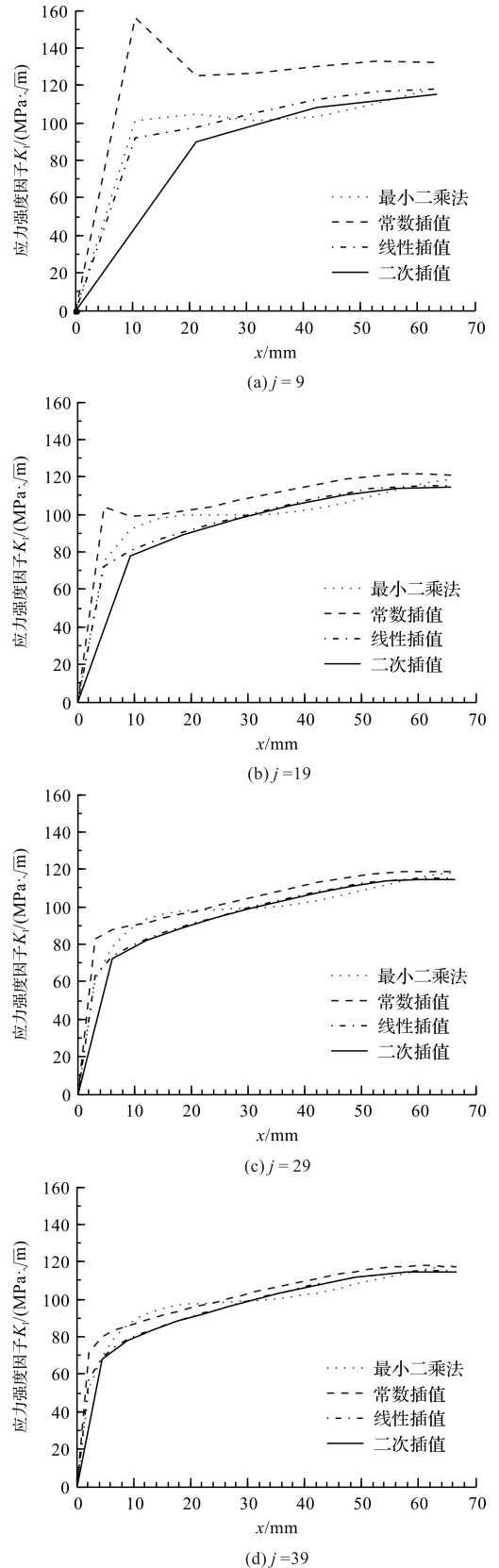


图4 应力强度因子计算结果

Fig. 4 Calculation results of stress intensity factor

从图4中可以看出:随着采集数据的增加,线性插值的计算结果逐渐逼近二次插值,常数项插值逐渐逼近

近线性插值;当 j 为 29 时,线性插值的计算结果基本能与二次插值重合,而最小二乘法的计算结果与之有较大误差,若以二次插值的计算结果为基准,最大的相对误差约为 15% (其主要原因是,开孔处的应力梯度变化大,最小二乘法拟合的三次多项式不能很好地表征应力的分布趋势)。

3.3 数据采集量对计算结果的影响

当采集的数据量 j 分别为 9、19、29、39 时,笔者用线性插值及二次插值,分别求解出各个裂纹深度下最深点处的应力强度因子。

不同 j 下的计算结果如图 5 所示。

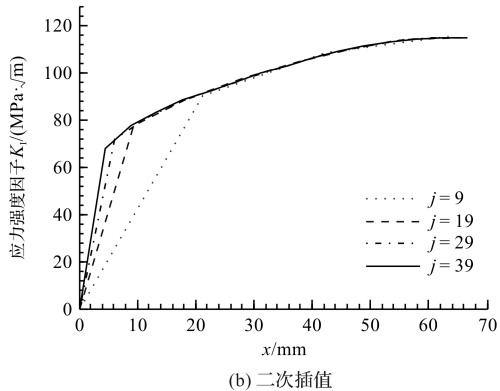
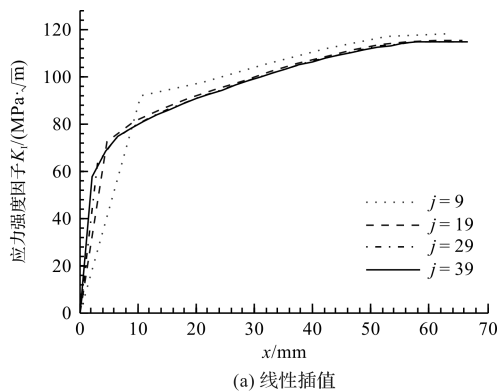


图 5 不同 j 下的计算结果

Fig. 5 Calculation results under different j

从图 5 中可以看出:当 j 为 29 时,两种方法在较大裂纹深度下的计算结果均趋于稳定。由于较小裂纹深度下的应力梯度很大,所以还需要增加数据的采集量才可使计算结果趋于收敛,从而表现出随着 j 的增大,较小裂纹深度下的计算结果逐渐稳定的趋势。

考虑到线性插值的计算过程明显比二次插值更简单,因而其更适合于工程计算,但应有较多的数据采集量。

3.4 计算结果验证

笔者使用 ANSYS 软件,将提取出的应力分布作用在实体的上平面,底部设置法向约束,中间有一半圆形裂纹。

有限元分析结构模型如图 6 所示。

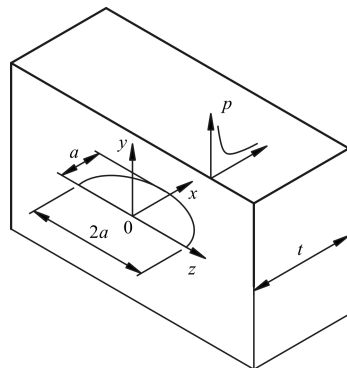


图 6 有限元分析结构模型

Fig. 6 Finite element analysis of structural models

模型整体采用六面体网格,裂纹前缘采用奇异单元网格,裂纹附近区域采用四面体网格。

含半圆形裂纹结构划分的网格如图 7 所示。

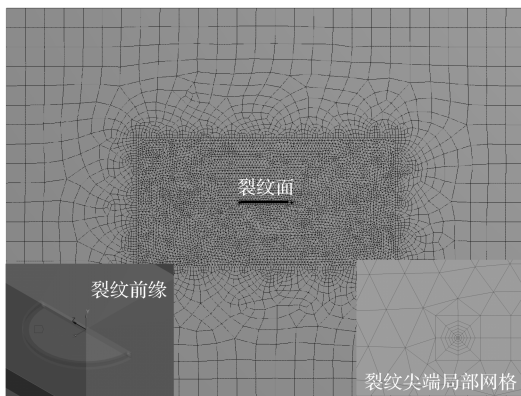


图 7 含半圆形裂纹结构划分的网格

Fig. 7 Meshing of structures with semicircular cracks

笔者使用 ANSYS 计算出一系列半圆形裂纹最深点处的应力强度因子。

线性插值与有限元法的计算结果如图 8 所示。

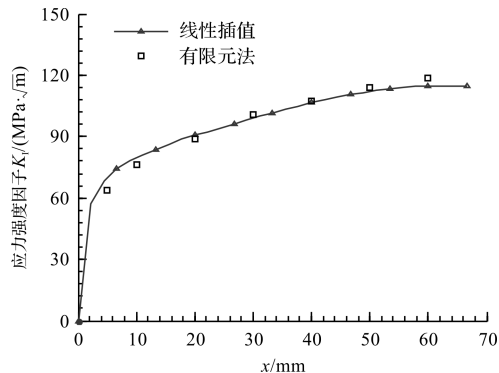


图 8 线性插值与有限元法的计算结果

Fig. 8 Linear interpolation and FEA calculation results

从图 8 中可以明显看出:两者的计算结果具有高度的一致性。

4 结束语

笔者从理论上推导出了基于分段插值(常数插

值、线性插值、二次插值)求解应力强度因子的计算方法,对比了常规最小二乘法与分段插值法的应力分布表征精度及计算结果;分析了数据采集量对线性插值和二次插值计算结果的影响,对比验证了线性插值与有限元法的计算结果。

研究结论如下:

1) 在同样的采集数据量下,应力分布表征精度为:最小二乘法 < 常数插值 < 线性插值 < 二次插值,从而导致最小二乘法计算结果的相对误差约为 15% ;

2) 随着采集数据量的增加,线性插值的计算结果逐渐逼近二次插值,并能较快收敛,但二次插值计算过程明显比线性插值更复杂。因而,从工程计算方面考虑,可以选用线性插值计算,但应给出较多的数据采集量;

3) 基于开孔处的应力分布数据,将线性插值与有限元法的计算结果进行了对比,发现两者高度一致,表明笔者使用的线性插值计算方法具有相当的可靠性。

后续阶段,笔者将进一步研究超高压容器开孔处裂纹应力强度因子的计算方法,以便得出该部位的疲劳扩展寿命(基于断裂力学分析方法)。

参考文献 (References):

- [1] 赵原. 断裂力学在压力容器疲劳裂纹扩展中的应用[J]. 设备管理与维修, 2020, 41(2): 128-129.
ZHAO Yuan. Application of fracture mechanics in fatigue crack propagation of pressure vessels[J]. Plant Maintenance Engineering, 2020, 41(2): 128-129.
- [2] 伍颖. 断裂与疲劳[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008.
WU Ying. Fatigue and Fracture [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2008.
- [3] 李群, 欧卓成, 陈宜亨. 高等断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
LI Qun, OU Zhuo-cheng, CHEN Yi-heng. Advanced Fracture Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [4] GB/T 34019, 超高压容器[S]. 北京: 全国锅炉压力容器标准化技术委员会, 2017.
GB/T 34019, Ultra-high Pressure Vessel [S]. Beijing: National Boiler and Pressure Vessel Standardization Technical Committee, 2017.
- [5] 陈志伟, 李涛, 杨国义, 等. GB/T 34019—2017《超高压容器》标准分析[J]. 压力容器, 2019, 36(4): 46-51.
CHEN Zhi-wei, LI Tao, YANG Guo-yi, et al. Technical progress in GB/T 34019—2017 standard “Ultra-high pressure vessel” [J]. Pressure Vessel Technology, 2019, 36(4): 46-51.
- [6] ASME BPVC VIII-3, Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels[S]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2021.
- [7] 高耀东, 王壮壮, 郭忠亮. 初始裂纹对超高压容器疲劳寿

- 命的影响研究[J]. 机电工程, 2021, 38(11): 1506-1512.
GAO Yao-dong, WANG Zhuang-zhuang, GUO Zhong-liang. Influence of initial cracks on fatigue life of ultra-high-pressure vessels [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(11): 1506-1512.
- [8] 秦媛媛, 秦晓峰, 陈占春. 厚壁筒内表面平行双轴向裂纹间影响规律研究[J]. 机电工程, 2022, 39(2): 276-280.
QIN Yuan-yuan, QIN Xiao-feng, CHEN Zhan-chun. Factors influence on the interference of parallel biaxial cracks in inner surface of thick-walled pipe [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(2): 276-280.
- [9] 袁舒梦, 黄淞, 惠虎. 基于 GB/T 34019 标准与 ASME VIII-3 标准的钢制瓶式容器疲劳寿命分析[J]. 压力容器, 2022, 39(1): 69-78.
YUAN Shu-meng, HUANG Song, HUI Hu. Fatigue life assessment of steel cylinders based on GB/T 34019 and ASME VIII-3 [J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(1): 69-78.
- [10] RAJU I S, NEWMAN J C. Stress-intensity factors for internal and external surface cracks in cylindrical vessels [J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME, 1982, 104(4): 293-298.
- [11] JONES I S, ROTHWELL G. Reference stress intensity factors with application to weight functions for internal circumferential cracks in cylinders [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68(4): 435-454.
- [12] SHEN G, GLINKA G. Determination of weight functions from reference stress intensity factors [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1991, 15(3): 237-245.
- [13] CIPOLLA R C. Technical Basis for the Revised Stress Intensity Factor Equation for Surface Flaws in ASME Section XI Appendix A [C] // Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference. Honolulu: ASME, 1995: 105-121.
- [14] CIPOLLA R C, LEE D R. Technical Basis for Equations for Stress Intensity Factor Coefficients in ASME Section XI appendix A [C] // Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference. San Diego: ASME, 2004: 301-312.
- [15] BUECKNER H F. A novel principle for the computation of stress intensity factors [J]. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1970, 50(9): 529-546.
- [16] RICE J R. Some remarks on elastic crack-tip stress fields [J]. International Journal of Solids and Structures, 1972, 8(6): 751-758.
- [17] GLINKA G, SHEN G. Universal features of weight functions for cracks in mode I [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1991, 40(6): 1135-1146.
- [18] ZHENG X J, KICIAK A, GLINKA G. Weight functions and stress intensity factors for internal surface semi-elliptical crack in thick-walled cylinder [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1997, 58(3): 207-221.
- [19] 田野. 弯曲载荷下管道环焊缝裂纹应力强度因子评价模型及试验验证[J]. 压力容器, 2023, 40(7): 29-35.
TIAN Ye. Evaluation and experimental verification of stress intensity factors for pipeline girth welds with crack defect under bending load [J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(7): 29-35.

本文引用格式:

汪志福, 秦宗川, 张羽, 等. 超高压容器开孔处裂纹最深点处应力强度因子的计算方法[J]. 机电工程, 2024, 41(6): 1109-1115.

WANG Zhifu, QIN Zongchuan, ZHANG Yu, et al. Calculation method of stress intensity factor at deepest point of crack at opening of ultra-high-pressure vessel [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(6): 1109-1115.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>