

文章编号: 1007-7294(2023)05-0731-11

# X80天然气管道环焊缝复合缺陷应力强度因子的工程化计算方法研究

李继红,董玉凡,苟川东,曹欣蕾,张敏

(西安理工大学材料科学与工程学院,西安 710048)

**摘要:**针对X80管道环焊缝中同时存在的“错边+裂纹”复合缺陷进行工况受力分析,结合弹性有限元方法分别对“错边+内表面裂纹”和“错边+埋藏裂纹”含复合缺陷管道进行三维有限元分析,总结裂纹尺寸、轴向应力、管道壁厚、焊缝错边量及裂纹的位置对应力强度因子的影响规律。在此基础上,引入裂纹尺寸修正系数,提出应力强度因子工程计算公式。将有限元分析与理论推导值对比,其误差在3%以内;应力强度因子计算公式结果与有限元结果的误差小于5%,表明了其准确性。

**关键词:**应力强度因子;“错边+裂纹”复合缺陷;环焊缝;有限元分析

**中图分类号:** TE88 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2023.05.012

## Stress intensity factors of X80 gas pipeline with composite defects in girth weld based on elastic finite element analysis

LI Ji-hong, DONG Yu-fan, GOU Chuan-dong, CAO Xin-lei, ZHANG Min

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The stress analysis of girth weld of X80 pipeline with "misalignment and crack" under working conditions was implemented. Combined with the elastic finite element method, the three-dimensional finite element analysis of the pipeline with composite defect of "misalignment and internal surface crack" and "misalignment and embedded crack" was carried out, in which the effects of crack size, axial stress, thickness, misalignment and crack location on the stress intensity factor were calculated. Based on these, the crack size correction factor was introduced and the engineering calculation formula of stress intensity factor (SIF) was put forward. Comparison of the finite element analysis with the theoretical derivation shows that the error is less than 3%, and the error between the stress intensity factor calculation formula result and the finite element result is less than 5%, which indicates its correctness and accuracy.

**Key words:** stress intensity factor (SIF); "misalignment and crack" composite defect; girth weld; finite element analysis

收稿日期: 2022-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974243)

作者简介: 李继红(1973-),男,博士,副教授,通讯作者,E-mail: lijihong@xaut.edu.cn。

## 0 引言

在过去的几十年里对石油和天然气资源的需求不断增长,利用管道运输油气资源是受到全世界认可的最经济合理的方式,因此管道运输业经历了飞速的发展<sup>[1-3]</sup>。但管道是典型的焊接结构,在焊接作业时管道会经历一系列复杂的热过程,同时受到施焊条件限制,焊缝处往往存在一些难以避免的焊接缺陷,如裂纹、错边、未焊透、噉嘴和夹渣等<sup>[4]</sup>。自2008年以来,随着高钢级、大口径管道的大量建设,在管道运行初期就发生了数起管道环焊缝泄漏或焊缝开裂的安全事故<sup>[5]</sup>。因此,可以认为,环焊缝是整个管道结构中的薄弱环节,应当重点关注环焊缝处的缺陷。目前,国内外学者针对管道裂纹缺陷进行了大量研究,刘庆刚等<sup>[6]</sup>采用1/4节点法建立长输管道轴向穿透裂纹应力强度因子计算的有限元模型,分析了内压、裂纹长度、内径等参数对裂纹尖端应力应变场的影响及应力强度因子沿壁厚方向的变化规律;潘玉林等<sup>[7]</sup>以X60管道为研究对象,分析了悬跨长度、海流速度、内压、裂纹形状等参数对海底悬跨油气管道外表面环向裂纹应力强度因子的影响规律;赵鹏成等<sup>[8]</sup>利用有限元软件ANSYS模拟分析了静水压试验和正常运行条件下错边及接头设计系数对环形焊接接头应力分布的影响;李戎等<sup>[9]</sup>根据功能梯度材料圆筒与均匀材料圆筒裂纹尖端应力值与应力强度因子之间的稳定比例关系,提出了一种适用于含环形裂纹功能梯度材料圆筒的应力强度因子计算方法并与多组算例进行对比分析验证了该方法的可行性;Hoh等<sup>[10]</sup>开发了一种环焊缝表面裂纹应力强度因子和焊趾放大系数计算方法,对不同裂纹几何形状条件下焊趾表面裂纹尖端应力场、焊趾放大系数进行求解,并对裂纹扩展进行了预测分析;Elamvazhudi、Ramachandra等<sup>[11-12]</sup>使用有限元分析方法研究了疲劳载荷作用下裂纹萌生及扩展规律,对单轴拉伸载荷下半椭圆裂纹表面构件的应力强度因子值进行了实验及数值分析,并对应力强度因子对结构疲劳寿命的影响进行预测;Li等<sup>[13]</sup>研究了复合修复系统(CRS)加固条件下管道内表面裂纹应力强度因子及裂纹扩展速率。

目前针对含裂纹管道研究主要集中在单一缺陷、单一载荷下的应力强度因子,而对于复杂载荷条件下多种缺陷的复合影响缺乏足够全面的考虑,且在一定程度上,尚存在计算过程复杂、试验花费巨大、对工程技术人员的专业能力有较高要求等问题。有鉴于此,本文在有限元分析的基础之上,提出了针对环焊缝含复合缺陷的X80天然气管道应力强度因子的工程化计算方法。

## 1 应力强度因子有限元计算

### 1.1 研究对象

本研究将对中俄东线X80天然气管道环焊缝中的缺陷进行分析。这是2019年底正式投产运行的一条外径为1422 mm的天然气管道,输送压力最大为12 MPa<sup>[14-15]</sup>。该管线使用自动焊技术连接,由于焊缝处熔池浅而窄,而管道壁厚较大,在焊接施工过程中出现了占比很高的未熔合缺陷,加之现场管道焊接施工过程中焊口无法准确对接,形成了大量的错边缺陷。因此,在焊后进行缺陷检测时发现了很多“错边+未熔合”的复合缺陷情况<sup>[16]</sup>。根据现行标准,焊缝中未熔合、夹渣等缺陷都可以等效视为一定尺寸的裂纹缺陷<sup>[17]</sup>,因此本文将针对X80管道环焊缝中的“错边+裂纹”复合缺陷进行计算,引入应力强度因子工程计算模型,将该模型直接用于含复合缺陷管道工程安全评定工作,可有效简化评定流程,提高评定效率。

为便于计算,根据位置将焊缝中的裂纹缺陷简化为内表面裂纹和埋藏裂纹,然后对裂纹尖端应力场进行分析计算。根据《中俄东线焊接工艺规程》中规定的全自动焊的坡口形式建立接头物理模型,焊缝坡口尺寸及裂纹位置如图1所示。根据标准SY/T 6477<sup>[17]</sup>对焊缝中常见缺陷进行等效简化,视其为一定尺寸的半椭圆型裂纹。

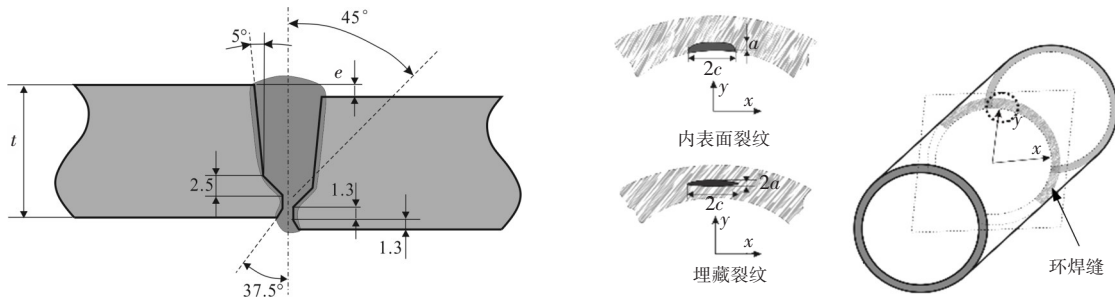


图1 焊缝坡口尺寸及裂纹位置示意图

Fig.1 Weld groove and crack location

对管道而言,环向应力主要对轴向缺陷有效地作用,而轴向应力主要对环向缺陷有效作用,因此在对含复合缺陷环焊缝进行受力分析时,主要考虑轴向应力的影响。为了方便计算,在本研究中将轴向应力简化为 $0.3\sigma_y$ 和 $0.5\sigma_y$ ,其中 $\sigma_y$ 为材料的屈服强度,本文取555 MPa。

在本研究中,为了给实际工程提供足够范围的评定结果,综合考虑轴向应力、裂纹尺寸、管道壁厚、焊缝处错边量及裂纹位置等因素对裂纹尖端应力应变场的影响,并分析多种裂纹尺寸 $a/c$ 、不同深宽比 $alt$ 条件下的应力强度因子,本文共有2(裂纹位置) $\times$ 2(轴向载荷) $\times$ 3(裂纹深度) $\times$ 4(裂纹长度) $\times$ 4(管道壁厚) $\times$ 5(错边量)=960个模型,如表1所示。

表1 “错边+裂纹”复合缺陷模型参数

Tab.1 Parameters of "misalignment+crack" composite defect model

裂纹位置	轴向外载 $F/\text{MPa}$	裂纹尺寸			管道壁厚 $t/\text{mm}$	错边量 $e/\text{mm}$
		$alt$	$2alt$	$a/c$		
内表面裂纹	166.5 MPa ( $0.3\sigma_y$ )	0.2			17.8	2
		0.4		0.125		3
		0.6		0.25		4
埋藏裂纹	277.5 MPa ( $0.5\sigma_y$ )		0.2	0.5	30.8	5
			0.4	1		6
			0.6			

1.2 围线积分法

裂纹尖端附近区域应力应变场复杂,为了对其进行准确分析,利用具有守恒性的二维线积分进行分析计算,即围线积分。由于围线积分路径的独立性,即围绕裂纹尖端的线积分结果与所选择积分路径无关,因此可以沿着远离裂纹尖端奇异区的路径进行积分,可以得到较为精确的计算裂纹尖端的应力场和能量场计算结果<sup>[18]</sup>。 $J$ 积分是由Rice将Eshelby提出的积分公式应用于断裂力学中,形成了完善的 $J$ 积分理论<sup>[19-20]</sup>,其物理意义就是沿着二维积分面上任意一个始于裂纹下表面、止于裂纹上表面的积分路径获得的能量值。在线弹性断裂力学领域, $J$ 积分可以表示为裂纹扩展单位面积时释放出的能量,即能量释放率 $G$ ,同时与应力强度因子 $K_I$ 有如下关系:

$$\begin{cases} J = G = \frac{K_I^2}{E'} \\ E' = \begin{cases} \frac{E}{1-\nu^2} & (\text{平面应变}) \\ E & (\text{平面应力}) \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $E$ 为弹性模量, $\nu$ 为泊松比。围线积分法就是在求得 $J$ 积分的前提下计算应力强度因子。该方法通过计算含裂纹体任意一条裂纹尖端附近围线积分路径的位移场和应力应变场,从而精确得到该裂纹尖端的应力强度因子,如图2所示<sup>[21]</sup>。

该方法建模简便,其核心是奇异单元的构造。为解决裂纹尖端 $r^{-1/2}$ 的奇异性,需要将裂纹尖端一

周的等参单元边上的中间1/2位置处节点移到靠近尖端的1/4位置处,然后单元顶点处三个节点坍塌,重合为一个节点,就形成了如图3所示的奇异单元。利用奇异单元计算裂纹尖端附近应力,计算精度高、效率高,得到了广泛使用<sup>[22-23]</sup>,本研究中也采用此方法计算裂纹尖端应力场。

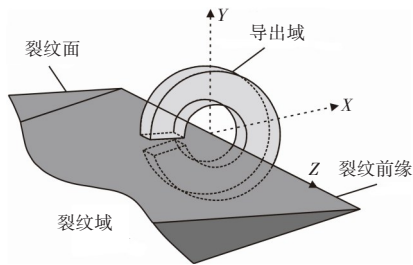


图2 围线积分示意图

Fig.2 Contour integral diagram

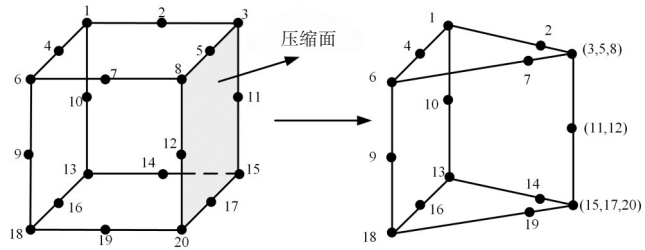


图3 奇异单元

Fig.3 Singular element

### 1.3 有限元模型建立

本文假定 X80 管线钢为理想线弹性材料,不考虑应变硬化对计算结果的影响。基于这个假设在有限元软件中建立含“错边+裂纹”复合缺陷天然气管道的弹性断裂数值模型。由于管道所受内压在表面上均匀分布,而在端面处施加的均匀轴向拉伸载荷也呈对称分布,因此在有限元分析时可将其简化为轴对称问题。建立几何模型时,整个管道结构以环向裂纹的中心为对称中心,垂直裂纹面的 X-Y 平面为对称面,建立含裂纹管道的 1/4 模型,用镜像命令得到管道完整几何结构。焊缝裂纹附近是重点分析部位,网格精度要求高,采用奇异单元划分为“蜘蛛网”状网格,而管道其余部分结构简单,对网格精度要求不高,直接使用三维八节点线性六面体结构单元 C3D8R 进行划分<sup>[24]</sup>,如图4所示。

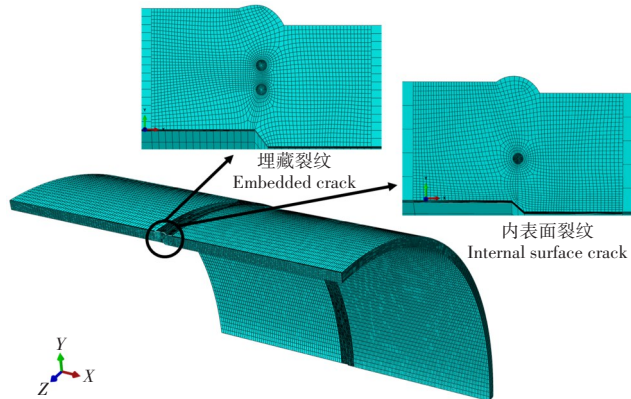


图4 有限元网格划分

Fig.4 FE mesh generation

有限元软件 ABAQUS 中,在指定裂纹面上通过 SEAM 法插入裂纹,首先指定裂纹前缘,然后规定裂纹面的法向及其扩展方向,完成裂纹相关设置,如图5所示。由于断裂问题的特殊性,需要对裂纹附近细致研究。因此,为提升计算效率和后续研究,将裂纹附近区域与管道其余区域分别建立在两个不同的部分中,再将这两部分独立装配起来,成为一个完整的管道模型。

值得注意的是,本研究采用围线积分法求解应力强度因子,其本质是利用 J 积分理论,选取尖端附近数条路径进行积分求解。积分路径根据裂纹附近节点自由选取,为使结果更精确,提前设置 10 条辅助线进行节点选取,如图6所示,这样路径更加规则,结果更精确。

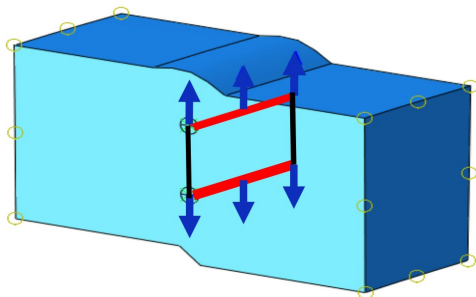


图5 裂纹设置

Fig.5 Setting of cracks

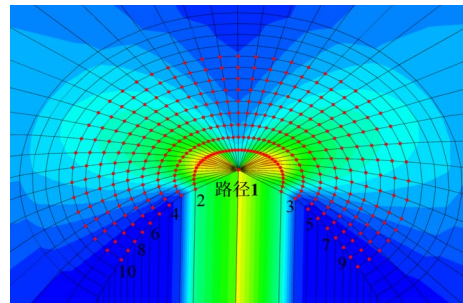


图6 积分路径设置

Fig.6 Setting of integral paths

### 1.4 有限元模型验证

为了验证本研究所建立的有限元模型的准确性,根据应力强度因子手册建立如图7所示含环向内外表面裂纹的管道模型。该模型中,管道受到轴向均匀拉伸载荷,网格划分方式与边界条件同本研究中使用模型一致,裂纹尖端处采用奇异单元划分,其余部分采用六面体结构单元划分。根据几何结构及载荷对称性,只建立1/4有限元计算模型,计算出该模型的裂纹尖端应力强度因子值,并与应力强度因子手册<sup>[25]</sup>中的理论值进行比较,用以验证本研究中有有限元计算方法的可靠性。

利用上述有限元模型计算管道裂纹尖端的应力强度因子值,管道壁厚取21.4 mm,管道外径为1422 mm,轴向拉伸载荷为166.5 MPa,裂纹尺寸 $a/t$ 取0.1/0.2/0.3/0.4/0.5来计算。将得到的有限元计算结果 $K_I$ 与应力强度因子手册中理论计算得到的结果进行比较,结果见表2。可以看出,有限元计算结果与理论值比较接近,计算误差最大不超过3%。可以认为本研究中建立的含裂纹管道的应力强度因子的有限元计算模型是可靠的。

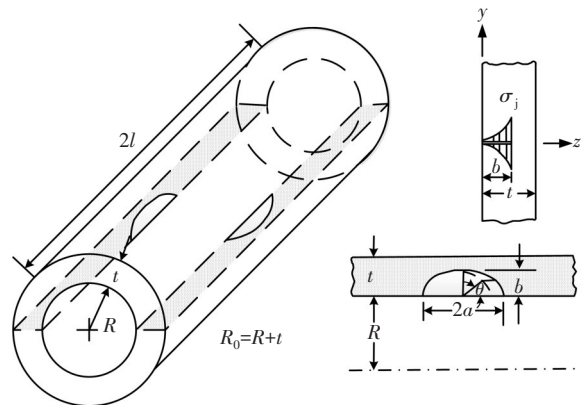


图7 含环向内表面裂纹管道验证理论模型<sup>[25]</sup>

Fig.7 Pipeline verification model with circumferential internal surface cracks<sup>[25]</sup>

表2 有限元模型结果验证

Tab.2 Verification of FEM results

$a/t$	理论 $K_I$ 值/(MPa·√m)	FEM $K_I$ 值/(MPa·√m)	误差
0.1	16.55	16.93	2.29%
0.2	26.87	26.35	1.94%
0.3	36.74	36.02	1.96%
0.4	58.51	59.31	1.37%
0.5	86.34	87.18	1.17%

## 2 含复合缺陷环焊缝应力场分析

在线弹性条件下,当裂纹尺寸与形状确定后,应力与应力强度因子大小成正比。应力强度因子的本质还是反映缺陷附近的应力分布变化,借助有限元方法可以更加直观地看到应力的分布状况。因此在进行安全评定时,如焊缝处应力复杂难以确定,则在缺陷的尺寸及位置已知的情况下,采用应力强度因子 $K_I$ 进行判定是一种有效的方式。焊缝两侧各取20 mm的区域作为应力场的研究对象,对其应力分布进行进一步分析。

当压力管道焊接接头不存在缺陷时,焊缝处承载截面是完整连续的,焊缝余高和焊趾处过渡圆弧取值是合理的,接头的受力是比较均匀的,应力集中系数一般很小。当焊接接头处存在错边时,错边缺陷会使管道焊缝结构的外形尺寸发生突变,造成形状不连续,管道截面的有限承载面积减小,在错边处引起较强的应力集中和弯曲应力,明显地降低焊接接头的强度和韧性。从图8(a)可以看出,上表面从左到右的结构由“凸出”变为“凹陷”,应力值增大变化从低到高;而下表面的结构变化是由“凹陷”到“凸出”,应力变化是从高到低。即“凹陷”结构处应力整体比“凸出”结构大,管道凹陷结构处更危险。从图8(b)可以看到,裂纹尖端两侧的应力呈“蝴蝶状”对称分布,管道上表面应力的峰值是在余高右侧,即在变形以后的“凹陷”结构处,而低谷处的应力值是在焊缝左侧,因为内表面裂纹相对变形较大,母材受挤压而应力减小,且管道内表面焊趾处由于开裂释放了部分应力,故应力相对较小。

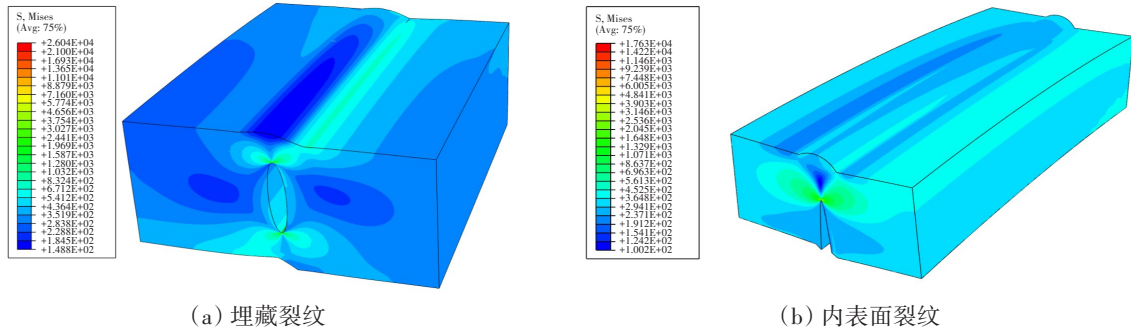


图8 含缺陷焊缝等效应力场

Fig.8 Equivalent stress field of weldment with defects

相同尺寸的裂纹在焊缝中心埋藏和内表面处的应力场的分布情况如图9所示。显然,裂纹位置不同所产生的应力集中效果也不相同,内表面裂纹下方焊缝受外力变形较大,导致裂纹尖端处的应力集中程度增加,而埋藏裂纹尖端处未扩展开裂,且整个裂纹都处于焊缝中心,相对变形较小,所以其裂纹尖端的应力较内表面裂纹小。由于受到内压作用埋藏裂纹的下尖端应力较上尖端大,在后续工作中采用埋藏裂纹下尖端的应力值。当内表面裂纹较浅时,左侧焊趾较薄,内压对其有明显的向内挤压的作用,在一定程度上阻碍了裂纹的扩展。当裂纹较深时,这种影响可忽略。

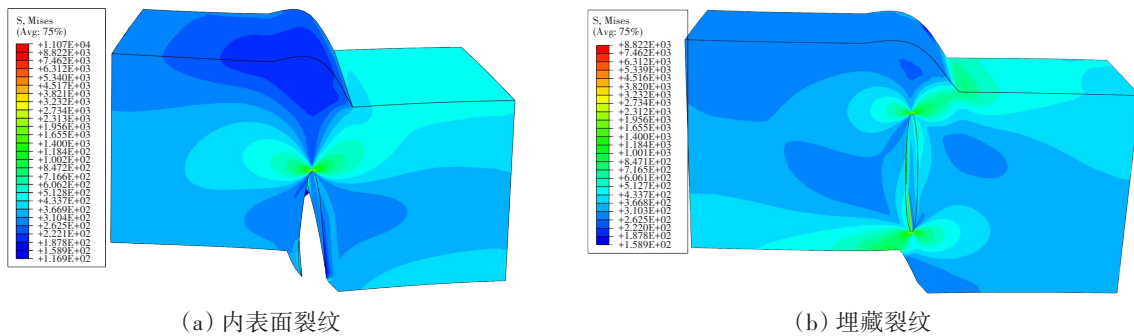


图9 不同位置裂纹的焊缝应力

Fig.9 Weld stress of cracks at different locations

### 3 复合缺陷应力强度因子工程计算模型

#### 3.1 含复合缺陷管道受力分析

目前对管道的受力分析在已有的评价标准规范中主要考虑内压的影响。根据石油行业标准SY/T 6477-2017,油气管道不含错边缺陷的情况下,管道仅受到膜应力作用,包括内压引起的膜应力 $\sigma_{m1}$ 和其余附加载荷引起的膜应力 $\sigma_{m2}$ :

$$\sigma_{m1} = \frac{PR_0^2}{R_0^2 - R_i^2} \tag{2}$$

$$\sigma_{m2} = \frac{F}{\pi(R_0^2 - R_i^2)} \tag{3}$$

式中, $F$ 为管道截面中心轴向力(N), $P$ 为管道运行内压(MPa), $R_0$ 和 $R_i$ 分别为管道外半径和内半径(mm)。

由于错边存在,管道焊缝结构连续性受到破坏,内压作用下在错边位置产生一定的弯曲应力 $\sigma_{b1}$ ;此外,轴向载荷 $F$ 的作用下也会产生附加弯曲应力 $\sigma_{b2}$ :

$$\sigma_{b1} = \sigma_{m1} \left[ \frac{12}{R_1 t_1} (0.25762 R_2 t_2 \frac{C_1}{C_2}) + \frac{e R_a}{2} \frac{C_2}{C_3} \right] \quad (4)$$

$$\sigma_{b2} = \sigma_{m2} [1 + \frac{6e}{t_1} (1 + \rho^{1.5})^{-1}] \quad (5)$$

式中,  $e$ 为焊缝处错边量,  $t_1, t_2$ 为两侧对接管道壁厚,  $R_a$ 为对接管道平均半径,  $R_a = \frac{R_1 + R_2}{2}$ 。另有

$$\begin{cases} C_1 = (\rho - 1)(\rho^2 - 1) \\ C_2 = \rho^2 + 2\rho^{1.5} + 1 \\ C_3 = (\rho^2 + 1)^2 + 2\rho^{1.2}(\rho + 1) \\ \rho = \frac{t_2}{t_1} \\ t_2 \geq t_1 \end{cases} \quad (6)$$

在本研究中,研究对象是等径管道,故两侧对接管道的形状尺寸一致,即  $t_2=t_1, R_2=R_1$ ,故  $\rho=1, C_1=0, C_2=4, C_3=8$ 。因此,式(4)和式(5)可简化为

$$\sigma_{b1} = \frac{3e}{t} \sigma_{m1} \quad (7)$$

$$\sigma_{b2} = \left(1 + \frac{3e}{t}\right) \sigma_{m2} \quad (8)$$

### 3.2 应力强度因子计算公式

对于含缺陷的管道来说,准确计算其裂纹尖端应力强度因子是进行缺陷安全评定的关键。而本研究计算的应力强度因子  $K_I$  是基于上述管道受力分析,结合 API 579 中提供的计算环向裂纹的应力强度因子理论公式来完成。其基本形式为

$$K_I = G_0 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (9)$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} \quad (10)$$

式中,  $G_0$ 是表面几何形状修正系数,  $\sigma$ 是管道所受应力,  $Q$ 是椭圆形状修正系数,  $a, c$ 分别是裂纹的深度和长度。公式中  $\sigma$ 为管道所受应力的简化,根据上一节对含缺陷的管道应力分析可知,存在错边时,管道在内压和轴向外载作用下主要产生膜应力和弯曲应力,即内压所产生膜应力  $\sigma_{m1}$ 、弯曲应力  $\sigma_{b1}$  与附加载荷所产生膜应力  $\sigma_{m2}$ 、弯曲应力  $\sigma_{b2}$  叠加如下:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_m + \sigma_b \\ \sigma_m = \sigma_{m1} + \sigma_{m2} \\ \sigma_b = \sigma_{b1} + \sigma_{b2} \end{cases} \quad (11)$$

因此,可以推断出裂纹尖端的应力强度因子值可以等效为

$$K_I = K_I^m + K_I^b \quad (12)$$

式中,  $K_I^m$ 和  $K_I^b$ 分别为膜应力和弯曲应力产生的应力强度因子分量。综合式(9)和式(12)可以得到

$$K_I = (G_m \sigma_m + G_b \sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (13)$$

结合式(10),该公式可以进一步写为

$$K_I = [G_m (\sigma_{m1} + \sigma_{m2}) + G_b (\sigma_{b1} + \sigma_{b2})] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (14)$$

将含“错边+裂纹”复合缺陷管道受到的膜应力与弯曲应力的计算公式代入式(14),便可以得到含“错边+环向裂纹”缺陷管道的应力强度因子计算公式:

$$K_1 = \left\{ G_m \left[ \frac{PR_0^2}{R_0^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_0^2 - R_i^2)} \right] + G_b \left[ \frac{3e}{t} \frac{PR_0^2}{R_0^2 - R_i^2} + \left( 1 + \frac{3e}{t} \right) \frac{F}{\pi(R_0^2 - R_i^2)} \right] \right\} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (15)$$

在公式(15)中,同时考虑到了内压 $P$ 、轴向外载 $F$ 以及错边存在时产生的附加弯曲应力的影响,其中 $G_m$ 、 $G_b$ 是裂纹形状修正系数,可以通过有限元计算的结果进一步得到。

### 3.3 裂纹形状修正系数

为了便于工程应用,基于大量管道中“错边+裂纹”复合缺陷的模型有限元计算结果,拟合出计算复合缺陷管道的应力强度因子公式,为后续的工程缺陷安全评定提供了基础。由于内表面裂纹和埋藏裂纹的位置不同引起的应力差异较大,故分开讨论其 $K_1$ 计算公式。针对管道中的“错边+埋藏裂纹”缺陷,公式(15)中的参数 $G_m$ 和 $G_b$ 是关于裂纹尺寸 $2alt$ 和 $alc$ 的函数,即 $G_{埋藏}=f(2alt, alc)$ ,见式(16)。同理,“错边+内表面裂纹”管道的参数 $G_m$ 和 $G_b$ 是关于裂纹尺寸 $alt$ 和 $alc$ 的函数,即 $G_{内表面}=f(alt, alc)$ ,见式(17)。

$$G_{埋藏} = \begin{cases} G_m = \sum_{i=0}^2 X_i \left( \frac{2a}{t} \right)^{2i} \\ G_b = \sum_{i=0}^2 Y_i \left( \frac{2a}{t} \right)^{2i} \end{cases} \quad (16)$$

$$G_{内表面} = \begin{cases} G_m = \sum_{i=0}^2 X_i \left( \frac{a}{t} \right)^{2i} \\ G_b = \sum_{i=0}^2 Y_i \left( \frac{a}{t} \right)^{2i} \end{cases} \quad (17)$$

其中:

$$X_i = \sum_{j=0}^3 X_{ij} \left( \frac{a}{c} \right)^{\frac{4}{3}j - \frac{1}{2}j^2 + \frac{1}{6}j^3} \quad (18)$$

$$Y_i = \sum_{j=0}^3 Y_{ij} \left( \frac{a}{c} \right)^{\frac{4}{3}j - \frac{1}{2}j^2 + \frac{1}{6}j^3} \quad (19)$$

式中,参数 $X_{ij}$ 的值借助origin软件结合大量有限元计算结果拟合得到。

#### 3.3.1 “错边+埋藏裂纹”计算结果

基于“错边+埋藏裂纹”有限元模型计算结果拟合出公式(18)及(19)中的参数 $X_{ij}$ 和 $Y_{ij}$ ,结果如下:

$$X_{3 \times 4} = \begin{vmatrix} 0.00883 & 0.0000506 & 0.0613 & -0.00104 \\ -0.00171 & 0.0489 & -0.18819 & 0.11745 \\ -0.06022 & -0.21706 & 0.89161 & -0.61577 \end{vmatrix}$$

$$Y_{3 \times 4} = \begin{vmatrix} 0.01123 & 0.00641 & -0.01249 & 0.00505 \\ 0.01546 & -0.09685 & 0.27669 & -0.16977 \\ 0.10847 & 0.20579 & -1.01745 & 0.72886 \end{vmatrix}$$

#### 3.3.2 “错边+内表面裂纹”计算结果

基于“错边+内表面裂纹”有限元模型计算结果拟合出公式(18)及(19)中的参数 $X_{ij}$ 和 $Y_{ij}$ ,结果如下:

$$X_{3 \times 4} = \begin{vmatrix} 0.03623 & -0.07662 & 0.11093 & -0.05204 \\ -0.14336 & 0.625105 & -1.047 & 0.52519 \\ 0.34296 & -1.22886 & 1.80071 & 0.847 \end{vmatrix}$$

$$Y_{3 \times 4} = \begin{vmatrix} -0.0189 & 0.08401 & -0.11393 & 0.05342 \\ 0.23686 & -0.80607 & 1.19137 & -0.56309 \\ -0.36326 & 0.92281 & -1.20788 & 0.55783 \end{vmatrix}$$

### 3.3.3 公示拟合结果验证

为了验证拟合得到的工程估算公式与有限元结果的误差,以最常用的管道规格为 D1422 mm×21.4 mm、轴向外载为 0.5 倍屈服强度、错边量为 6 mm 的管道为例,裂纹尺寸  $a/c$ 、 $2a/t$  的值为 0.2/0.4/0.6。将有限元计算结果与公式计算结果进行对比,验证结果如表 3 所示,误差控制在 3% 以内。表明上述拟合公式具有很好的精度,说明用该公式替代有限元计算应力强度因子是可行的。

表 3 埋藏裂纹  $K_I$  的有限元结果与公式结果对比

**Tab.3 Comparison of  $K_I$  between FEM and analytical results for embedded cracks**

$2a/t$	$a/c$	FEM $K_I$ 值(MPa· $\sqrt{m}$ )	公式 $K_I$ 值(MPa· $\sqrt{m}$ )	误差
0.2	0.2	28.96	29.56	2.03%
	0.4	26.78	26.32	1.75%
	0.6	24.15	23.84	1.30%
0.4	0.2	45.61	44.31	2.93%
	0.4	42.65	42.16	1.16%
	0.6	37.12	36.64	1.31%
0.6	0.2	74.12	72.65	2.02%
	0.4	63.69	62.31	2.21%
	0.6	56.23	55.12	2.01%

## 4 结 论

本文通过对环焊缝中同时存在“裂纹+错边”复合缺陷情况进行研究,得到了如下结论:

(1) 内表面裂纹尖端的应力强度因子大于埋藏裂纹,埋藏裂纹的下尖端处  $K_I$  值比上尖端处大,当内表面裂纹较浅时  $K_I$  随错边量增加而减小。

(2) 整体而言,裂纹尖端两侧区域应力呈“蝴蝶状”对称分布,“凹陷”结构处应力整体比“凸出”结构处大,即管道的凹陷结构处更危险。

(3) 拟合得到了环焊缝中含“错边+裂纹”复合缺陷情况的应力强度因子  $K_I$  的工程计算公式,其计算结果与有限元分析结果吻合良好。

### 参 考 文 献:

- [1] Witek M. Validation of in-line inspection data quality and impact on steel pipeline diagnostic intervals[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 56: 121-133.
- [2] Witek M, Batura A, Orynyak I, et al. An integrated risk assessment of onshore gas transmission pipelines based on defect population[J]. Engineering Structures, 2018, 173: 150-165.
- [3] Xie J, Xu X, Dubljevic S. Long range pipeline leak detection and localization using discrete observer and support vector machine[J]. AIChE Journal, 2019, 65(7): 1-20.
- [4] 逯燕玲. 油气输送管道对接焊缝中气孔的成因及控制措施[J]. 热加工工艺, 2009, 38(13): 169-171.  
Lu Yanling. Formative factors and preventive measures of weld porosity in butt welding of oil & gas transmission pipeline[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(13): 169-171. (in Chinese)
- [5] 任俊杰, 马卫峰, 慧文颖, 等. 高钢级管道环焊缝断裂行为研究现状及探讨[J]. 石油工程建设, 2019, 45(1): 1-5.  
Ren Junjie, Ma Weifeng, Hui Wenying, et al. Research status and prospect on fracture behaviour of butt girth welds in high grade steel pipelines[J]. Petroleum Engineering Construction, 2019, 45(1): 1-5. (in Chinese)
- [6] 刘庆刚, 张雄飞, 王文和, 等. 管道轴向穿透裂纹尖端应力强度因子数值模拟[J]. 油气储运, 2020, 39(7): 769-776.  
Liu Qinggang, Zhang Xiongfei, Wang Wenhe, et al. Numerical simulation of stress intensity factor at axial through-wall

- crack tip of pipeline[J]. *Petroleum Engineering Construction, Oil & Gas Storage and Transportation*, 2020, 39(7): 769–776. (in Chinese)
- [7] 潘玉林, 马廷霞, 轩恒. 海底悬跨管道表面裂纹应力强度因子分析[J]. *塑性工程学报*, 2019, 26(3): 251–256.  
Pan Yulin, Ma Tingxia, Xuan Heng. Stress intensity factor analysis of free spanning submarine pipeline surface crack[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26(3): 251–256.
- [8] 赵朋成, 刘佳奇, 胡艺腾, 等. 焊缝错位对 X80 钢管应力分布影响的数值预测[J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(2): 75–80.  
Zhao Pengcheng, Liu Jiaqi, Hu Yiteng, et al. Numerical prediction of the weld misalignment effect on stress distribution of X80 steel pipeline[J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 41(2): 75–80. (in Chinese)
- [9] 李戎, 杨萌, 梁斌, 等. 基于裂纹尖端应力比值的含裂纹功能梯度材料圆筒应力强度因子计算方法[J]. *工程力学*, 2020, 37(4): 22–29.  
Li Rong, Yang Meng, Liang Bing, et al. Calculation method of stress intensity factor for cracked functionally graded hollow cylinder based on the ratio of stresses at crack tip[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(4): 22–29. (in Chinese)
- [10] Hoh H J, Pang J H L, Tsang K S. Stress intensity factors for fatigue analysis of weld toe cracks in a girth-welded pipe[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 87: 279–287.
- [11] Elamvazhudi B, Gopalakannan S. Stress intensity factor calculations for semi-elliptical cracked joints using finite element analysis in 3D[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(5): 11808–11818.
- [12] Ramachandra M A, Vishnuvardhan S, Saravanan M, et al. Relevance vector based approach for the prediction of stress intensity factor for the pipe with circumferential crack under cyclic loading[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2019, 72(1): 793–803.
- [13] Li Zongchen, Jiang Xiaoli, Hopman H. Numerical analysis on the SIF of internal surface cracks in steel pipes reinforced with CRS subjected to bending[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2020, 15(10): 1070–1083.
- [14] Wu Kai, Liu Xiaoben, Zhang Hong, et al. Fracture response of 1422-mm diameter pipe with double-V groove weld joints and circumferential crack in fusion line[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 115(1): 104641.
- [15] 程玉峰. 保障中俄东线天然气管道长期安全运行的若干技术思考[J]. *油气储运*, 2020, 39(1): 1–8.  
Cheng Yufeng. Technical insights into the long-term integrity and sustainability of China–Russia eastern gas pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2020, 39(1): 1–8. (in Chinese)
- [16] 蒋庆梅, 张小强, 周广言, 等. 中俄东线管道的无损检测方法及应用[J]. *无损检测*, 2020, 42(7): 28–34.  
Jiang Qingmei, Zhang Xiaoqiang, Zhou Guangyan, et al. Nondestructive testing method and application of China–Russia eastern natural gas pipeline[J]. *Nondestructive Testing*, 2020, 42(7): 28–34. (in Chinese)
- [17] SY/T 6477–2017. 含缺陷油气管道剩余强度评价方法[S]. 2017.  
SY/T 6477–2017. Remaining strength evaluation for oil & gas pipeline with flaws[S]. 2017. (in Chinese)
- [18] 王健, 谢禹钧. 用 J 积分计算平端刚性压头 I 型裂纹应力强度因子[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2008, 28(1): 34–36.  
Wang Jian, Xie Yujun. The computing method of I-mode stress-intensity factor of rigid square-ended punch using J-integral[J]. *Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology*, 2008, 28(1): 34–36. (in Chinese)
- [19] Eshelby J D. The continuum theory of lattice defects[M]. *New York: Phys Rev B. Solid State*, 1956: 79–144.
- [20] Rice J R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1968, 35(2): 379–386.
- [21] 陆阳春, 张建铭. 基于 p 型有限元法和围线积分法计算复合型应力强度因子[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(1): 168–175+479–480.  
Lu Yangchun, Zhang Jianming. Calculation of composite mode stress intensity factor based on p-type finite element method and contour integral method[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(1): 168–175+479–480. (in Chinese)
- [22] 张巨银, 王文达, 王学平, 等. 解析法及数值法在求解压力容器缺陷应力强度因子中的应用[J]. *建材技术与应用*, 2021(3): 17–20.  
Zhang Juyin, Wang Wenda, Wang Xueping, et al. Application of the analytical and numerical method in solving stress intensity factor of pressure vessel defect[J]. *Research & Application of Building Materials*, 2021(3): 17–20. (in Chinese)

- [23] 王文亮. 基于 Workbench 的表面裂纹应力强度因子的对比分析[J]. 化工装备技术, 2021, 42(2): 28-31.  
Wang Wenliang. Comparative analysis of stress intensity factors of surface cracks based on Workbench[J]. Chemical Equipment Technology, 2021, 42(2): 28-31. (in Chinese)
- [24] 许良, 张宁, 周松, 等. 300 m 钢应力强度因子厚度效应的有限元分析[J]. 机械强度, 2016, 38(1): 167-172.  
Xu Liang, Zhang Ning, Zhou Song, et al. Finite element analysis of through thickness effects on 300 m steel stress intensity factor[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(1): 167-172. (in Chinese)
- [25] 中国航空研究院. 应力强度因子手册-增订版[M]. 北京: 科学出版社, 1993.  
Chinese Aeronautical Establishment. Handbook of stress intensity factor-Updated edition[M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)