

复合型裂纹拘束度及其承压结构失效评定图研究

缪新婷^{1,2} 刘国旭¹ 张锦波¹ 彭剑^{1,2} 别锋锋^{1,2}

(1. 常州大学机械与轨道交通学院, 常州 213164)

(2. 常州大学江苏省绿色过程装备重点实验室, 常州 213164)

摘要: 围绕平板试样和管道结构的裂尖拘束度以及失效评定图(Failure Assessment Diagram, FAD)进行研究,旨在探明试样和管道之间的适配性和关联性。基于有限元法获得了中心裂纹板(Central Cracked Plate, CCP)试样以及含裂纹承压管道裂尖的拘束度,发现单轴加载作用下的CCP试样裂尖拘束度与轴向拉载荷作用下的厚壁管道较匹配,而双轴载荷作用下的CCP试样与内压作用下的薄壁管道较匹配。此外,获得了CCP试样和管道结构的FAD,发现CCP试样的FAD受厚度的影响较小;指出平行于裂纹方向的应力是使得结构的失效评定曲线(Failure Assessment Curve, FAC)提高的主要因素。最后,发现具有相同拘束度水平、裂尖复合程度以及加载方式的两种结构,CCP试样的FAC高于承压管道的FAC,即采用CCP试样的FAD评定管道结构是不安全的。

关键词: 复合型裂纹; 拘束度; 失效评定图; 承压结构

中图分类号: TH114; O346.1 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.01.013

0 引言

压力容器、压力管道等承压类设备不仅是石油化工、核电、冶金等工业领域中的常用设备,同时也是极易发生重大事故的特殊设备。承压设备在投入使用之前不可避免地存在一些结构缺陷,缺陷的存在以及设备苛刻的使用条件等因素使得承压设备的断裂破坏事故不断增多,因此承压设备的安全一直备受学者的关注^[1-2]。钛材料比强度高、耐腐蚀性能好,同时具有较强的断裂韧性,克服了普通材料在比强度与断裂韧性上不可兼得的缺点^{[3]1308-1314}。在化工装备工业中,工业纯钛TA2凭借良好的耐蚀性能和可加工变形性能应用普遍^{[4]109-114}。因此,为了保证承压设备的安全性,对工业纯钛的断裂行为进行系统的研究很有必要。

拘束度作为裂尖状态的表征参数,是准确关联实验室试样与工程结构的桥梁^{[3]1308-1314};其可以看作是结构对裂纹尖端区材料塑性变形的阻碍,是影响材料断裂行为的重要因素。自20世纪80年代后期以来,断裂力学理论界对裂尖拘束度的量化进行了广泛的研究,发展出了 $K-T$ ^{[4]109-114}, $J-Q$ ^[5], $J-A_2$ ^{[6]296-307[7]}, $J-T_z$ ^[8], $K-T-T_z$ ^[9]等双/多参数断裂力学理论以及面内面外联合拘束度 A_p 参数理论^{[6]296-307}。 T 应力表示为平行于裂纹方向

的应力,其大小对I-II复合型裂纹尖端场有影响^[10],可作为线弹性或小范围屈服下I-II复合型裂纹的拘束度参数。对于双轴载荷作用下的中心裂纹板(Central Cracked Plate, CCP)试样(力的分解如图1所示^[11]),根据 T 应力的定义则可求得 T 应力的计算式[式(1)]。MIAO等^{[12][13]103042}经过系统研究得出I-II复合型裂纹面内拘束度存在的原因有:I型分量加载方式不同;双轴/多轴载荷作用下平行于裂纹面的应力所引起的拘束度不同。此外,WU等^{[14]40-51}采用三维有限元法研究了高温条件下周向表面裂纹的承压管道的拘束度和蠕变裂纹萌生问题,发现拘束度越高的裂纹前沿位置,应力水平越高,蠕变裂纹首先发生的危险性越大。王良军等^{[15]89-95}研究了拘束对管道焊缝应力的影响,发现管道残余应力随着拘束度的上升而增大,拘束水平对焊接残余应力的影响尤为明显。

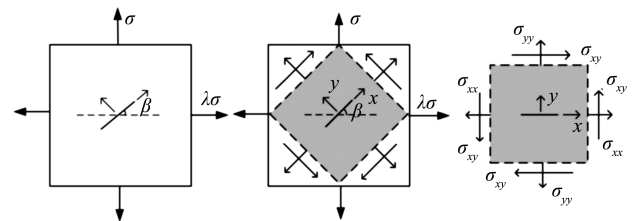


图1 双轴载荷作用下CCP试样的受力分析

Fig. 1 Force analysis of CCP specimen under biaxial load

收稿日期: 2023-04-11 修回日期: 2023-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(52105141, 52075050); 江苏省高等学校基础科学(自然科学)项目(21KJB460002); 江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX24_1659); 常州市科技计划项目(CJ20200080)

作者简介: 缪新婷,女,1991年生,江苏东台人,博士研究生,讲师,硕士研究生导师;主要研究方向为结构完整性与可靠性;E-mail: xintingmiao@163.com。

引用格式: 缪新婷,刘国旭,张锦波,等.复合型裂纹拘束度及其承压结构失效评定图研究[J].机械强度,2025,47(1):113-122.

MIAO Xinting, LIU Guoxu, ZHANG Jinbo, et al. Study on constraint of mixed mode crack and failure assessment diagram of pressure-bearing structure [J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(1): 113-122.

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \sigma(\lambda \cos^2 \beta + \sin^2 \beta) \\ \sigma_{yy} = \sigma(\cos^2 \beta + \lambda \sin^2 \beta) \\ T = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} = \sigma(\lambda - 1) \cos(2\beta) \end{cases} \quad (1)$$

失效评定图(Failure Assessment Diagram, FAD)作为一种含缺陷结构的安全评定方法,由于其简便又不失安全的特点而被工程界广泛采用,许多评定标准和规范都将其作为含缺陷承压管道安全评定的工程方法,现已被列入国内外多个含缺陷结构的失效评定中,如 CEBG/R6^[16]、SINTAP^[17]、BS7910^[18]、API579^[19]、FITNET^[20]、GB/T 19624—2004^[21]。且 CEBG/R6 规范^[16]已引入考虑拘束度效应的 FAD 评价方法。针对基于拘束度参数 T 应力和 Q 的断裂评定,国内外已经进行了一些研究。WANG 等^[22]研究了采用两个统一约束参数 A_p 和 A_d 对含有半椭圆周向内表面裂纹的裂纹管道韧性断裂进行约束的 FAD 评价方法,发现基于 A_p 和 A_d 两个统一约束参数,可以实现基于拘束的裂纹管道韧性断裂的统一 FAD 评估。WANG 等^[23]基于 Ramberg-Osgood 模型,结合拉伸试验要求,建立了基于应力-应变曲线的 FAD 曲线,能够满足 X52-X100 管道缺陷的精确评定要求,为管道和环焊缝缺陷评定提供便利和参考。CICERO 等^[24]针对结构部件断裂的评定方法进行了综述,并对比分析了欧洲 FITNET Fitness-for-Service (FFS) 和日本 International Standardization of Fracture Toughness Evaluation Procedure for Fracture Assessment of Steel Structure (IST) 两种纳入拘束度的评定方法的优劣以及局限性。JIN 等^[25]的结果表明对于低拘束度浅裂纹试样,传统的 BS7910 选择 1 方法给出了保守的评价结果,而纳入拘束度的 FAD 评定结果较为准确,与试验结果接近。MU 等^[26]则将面内面外统一拘束度参数 A_p 纳入 FAD 中,建立基于 A_p 参数的失效评定曲线 (Failure Assessment Curve, FAC)。

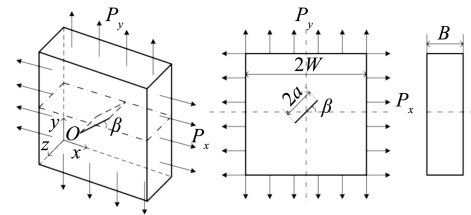
以上 FAC 的研究主要围绕 I 型裂纹,关于复合型裂纹 FAC 的研究相对较少。因此,本文将围绕含复合型裂纹的试样及管道结构,对其裂尖拘束度及其 FAD 进行研究,旨在探明双轴载荷、裂纹复合程度的影响,以及管道裂纹裂尖拘束度与双轴载荷作用下 CCP 的匹配程度。

1 研究对象及材料

1.1 CCP 和管道结构的形状及尺寸

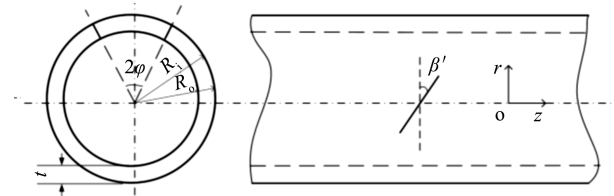
为研究复合型裂纹拘束度的影响因素,以及平板试样与管道结构之间拘束度的匹配程度,本文以双轴载荷作用下的 CCP 以及含裂纹的管道结构 (Pipe) 为研究对象,CCP 和管道结构形状及尺寸分别如图 2(a)、图 2(b) 所示。其中,CCP 试样的长度和宽度均为 $2W$,

W 取值为 20 mm; 厚度为 B , 本文涉及到的试样厚度 B 有 1、2、4 mm; 裂纹长度为 $2a$, 为避免边界条件的影响, 裂纹长度取 a/W , 取值为 0.2; 裂纹面与试样底边的倾斜角为 β , 本文涉及到的倾斜角 β 有 0° 、 30° 、 60° 和 90° , 其中 0° 、 90° 为 I 型裂纹, 30° 、 60° 为 I-II 复合型裂纹, 角度越大, II 型裂纹的比例越高。CCP 试样端部施加拉伸应力载荷, 其中, 沿 x 轴方向的应力定义为 P_x , 沿 y 轴方向的应力定义为 P_y , 两个方向的应力比 P_x/P_y 定义为 η , η 取值为 0、0.5。



(a) 双轴加载试样示意图

(a) Schematic diagram of biaxial loading specimen



(b) 承压管道示意图

(b) Schematic diagram of pressure bearing pipeline

图 2 研究对象示意图

Fig. 2 Schematic diagram of research object

管道结构的有限元模型如图 3 所示。 R_i 、 R_o 分别为管道的内、外径; t 为管道壁厚, $t = R_o - R_i$ 。管道外径 R_o 固定取值为 8 mm, 为研究管道壁厚 t 的影响, 内径 R_i 分别取值为 5.5、6.0、7.2、7.4、7.6 mm, 共 5 种厚度。其中, 内径 R_i 在 5.5~6.0 mm 时的管道为厚壁管道, 内径 R_i 在 7.2~7.6 mm 时的管道为薄壁管道。将管道长度 L 取值为 100 mm, 该长度可有效避免边界条件对裂尖状态的影响。裂纹长度以裂纹前沿半径方向的夹角 2ϕ 表示, 2ϕ 取值为 30° 。为保证管道裂纹的倾斜程度与 CCP 试样一致, 将管道裂纹与环向的夹角定义为 β' , 同样取值为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 。其中, 0° 为管道环向裂纹, 90° 为管道轴向裂纹, 此两种裂纹形式均为 I 型裂纹; 30° 、 60° 的管道裂纹裂尖为 I-II 复合型状态, 且倾斜角度越大, II 型裂纹的比例越高。管道结构考虑两种加载方式, 一种为拉伸载荷 (Tensile Loading, TL), 即在管道端部施加拉伸载荷; 一种为内压载荷 (Inner Pressure, IP), 除管道内壁处的内压载荷之外, 在端部还需施加由内压产生的拉应力。

本文 CCP 试样和管道结构使用的材料均采用化工装备行业广泛应用的工业纯钛材料 TA2, 其材料属性参考文献 [11], 弹性模量 E 为 118 GPa, 泊松比 ν

为 0.34, 屈服强度为 357 MPa, 抗拉强度为 570 MPa, 延伸率为 32%。

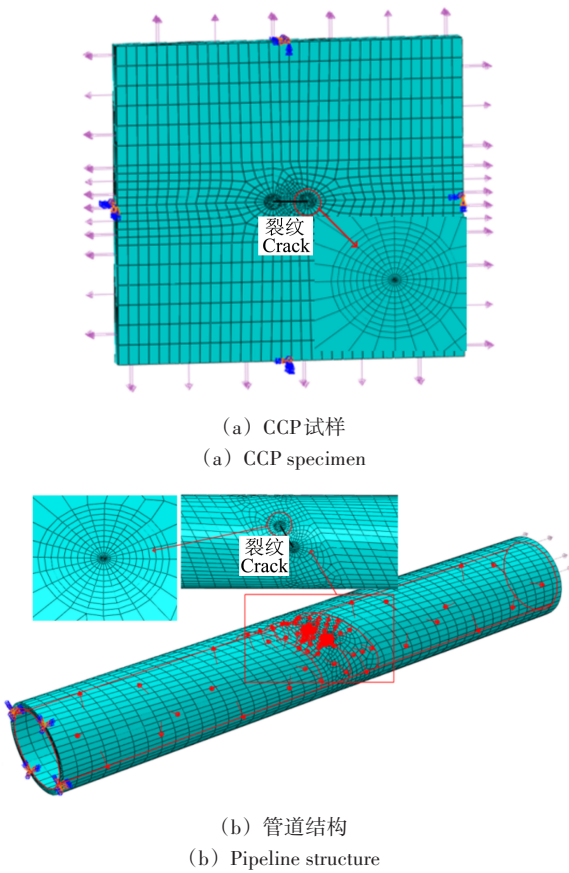


图 3 有限元网格模型

Fig. 3 Finite element mesh model

1.2 有限元模型

本文主要使用 Abaqus 有限元软件进行 CCP 试样、管道裂纹拘束度以及 FAD 的研究。由于 CCP 试样和管道结构的非对称性, 需要分别建立全模型进行研究, 建立的有限元网格模型如图 3(a)、图 3(b) 所示。CCP 试样端部施加拉应力载荷 P_x 、 P_y , 试样端部中心处除受力方向 (P_x 对应 x 方向, P_y 对应 y 方向) 其余方向均

固定, 管道结构端部施加全约束, 另一端施加轴向拉伸载荷, 或管道内壁施加内压载荷。图 3 中, 有限元模型的裂尖网格采用楔形网格并进行细化, 裂尖最小采网格尺寸为 0.01 mm, CCP 试样和管道壁的网格分十等份, 单元类型为线性减缩积分三维单元 C3D8R。该网格模型可准确模拟 I 型以及 I-II 复合型裂纹裂尖的变形行为^{[14]40-51[15]89-95}。

2 拘束度研究

本文采用线弹性 T 应力作为 CCP 试样和管道裂尖的拘束度参数, 并基于有限元法采用交互作用积分法^[27] 计算裂尖 T 应力。对于三维几何结构, 由于存在厚度的三维效应, 沿厚度方向的断裂参数不一致 (断裂参数沿厚度方向逐渐减小, 最小值出现在自由表面)^{[13]103042}, 所以本文 T 应力的分析均取裂纹前沿厚度方向上的平均值。以内压载荷作用下的管道 (pipe-IP) 为例, 其 T - J 曲线如图 4(a) 所示; T 应力与 \sqrt{J} 成单调线性关系, 如图 4(b) 所示; 其余加载情况 (CCP 试样的单轴、双轴拉伸载荷以及管道试样的轴向拉伸载荷), 曲线与图 4 基本一致。

基于这一现象, 定义无量纲参数 $T' = Ta/\sqrt{J}E$, 该无量纲参数与裂尖载荷水平无关, 可作为裂尖拘束度的定量表示参数。由于本文不考虑裂纹长度的影响 (a/W 尽量小, 以避免边界条件的影响), 因此 a 取值为单位长度 1 mm。计算获得新的拘束度参数 T' , 具体数值如表 1 所示。由表可以看出, T 应力与 CCP 试样及管道结构的壁厚相关, 特别是内压作用下的管道结构, 裂尖拘束度受壁厚的影响较大。此外, 表中还归纳了基于式 (1) 的理论解, 总体而言 CCP 试样的有限元解和理论解吻合度较高, 验证了所提有限元方法的准确性。

基于表 1 中的拘束度参数 T' , 图 5 给出了裂尖拘束度参数 T' 关于裂尖复合程度 $[K_{II}/(K_I + K_{II} + K_{III})]$

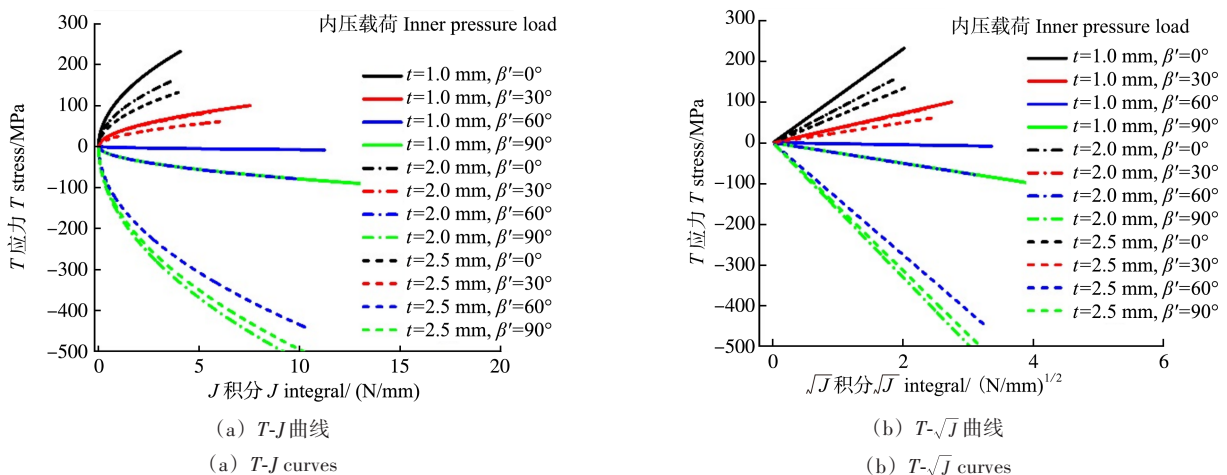


图 4 T 应力与 J 积分的关系曲线 (pipe-IP)

Fig. 4 Relationship curve between T stress and J integral (pipe-IP)

表 1 不同裂纹倾斜角下的拘束度参数

Tab. 1 Parameter of constraints at different crack inclination angles

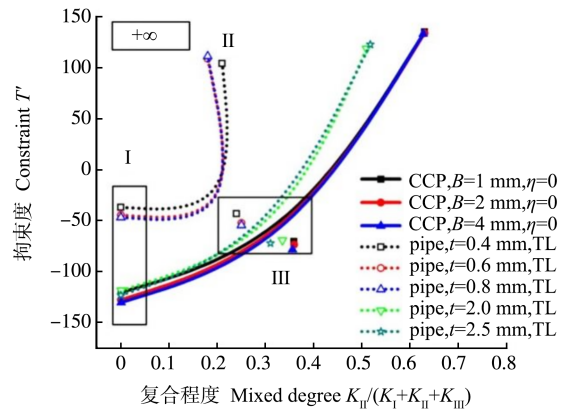
试样 Specimen	载荷类型 Loading type	厚度 Thickness/mm	基于有限元解的拘束度参数 Constraints parameter based on FEM solution T'				基于式(1)的拘束度参数 Constraints parameter based on equation (1) T			
			0°	30°	60°	90°	0°	30°	60°	90°
CCP试样 CCP specimen	$\eta = 0$	1	-120.8	-70.7	135.0	$+\infty$				
		2	-128.1	-74.0	133.6	$+\infty$	-123.2	-72.3	133.5	$+\infty$
		4	-130.7	-78.6	133.0	$+\infty$				
	$\eta = 0.5$	1	-55.8	-27.9	57.8	139.9				
		2	-63.0	-34.2	52.4	132.7	-63.5	-34.8	52.8	132.9
		4	-65.8	-39.3	47.8	129.2				
承压管道 Pressure pipe	拉伸载荷 Tensile load	0.4	-37.2	-43.6	104.0	$+\infty$				
		0.6	-45.0	-52.6	108.7	$+\infty$				
		0.8	-47.2	-54.9	111.1	$+\infty$	—	—	—	—
		2.0	-118.9	-69.7	118.5	$+\infty$				
		2.5	-123.6	-72.6	122.6	$+\infty$				
	内压 Inner pressure	0.4	138.3	78.8	21.4	-3.2				
		0.6	129.4	63.8	5.9	-22				
		0.8	121.3	59.1	-6.5	-33.7	—	—	—	—
		2.0	83.9	35.5	-25.3	-165.3				
		2.5	66.5	24.8	-137.7	-156.9				

的关系曲线,同时将 CCP 试样和管道结构的裂尖拘束度参量进行对比分析。由图 5 可知,CCP 试样裂尖拘束度 T' 随着 K_{II} 分量的增大逐渐增大,并且载荷比 η 越大,拘束度 T' 越高。结合 T 应力的定义,产生这种现象的原因为平行于裂纹方向的应力 σ_{xx} 越高,拘束度 T' 越高;其根本原因就是平行于裂纹方向的应力可以有效降低裂纹的张开变形。

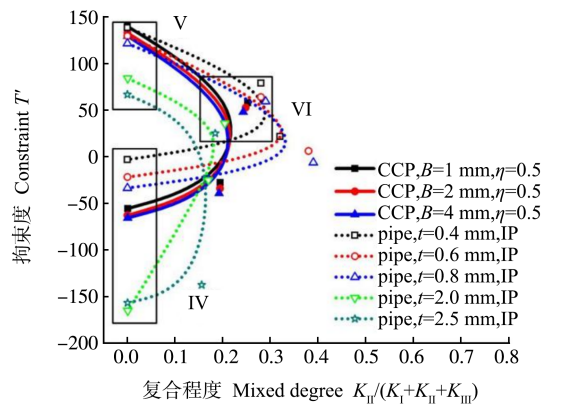
管道的裂尖拘束度与管道壁厚、加载方式以及裂尖复合程度相关,主要表现为平行于裂纹方向的应力 σ_{xx} 越高,拘束度 T' 越高。在轴向拉伸载荷作用下的薄壁管道裂尖拘束度要高于厚壁管道,并且薄壁管道裂尖拘束度受管道壁厚的影响较小,而在内压载荷作用下的管道裂纹受壁厚的影响则较大。

单轴加载作用下(即 $\eta = 0$)的 CCP 试样以及拉伸载荷作用下(TL)的厚壁管道,两者裂尖都呈现 I 型裂纹状态,裂尖拘束度曲线接近;两者结构裂尖的拘束度随着裂尖 K_{II} 分量的增大逐渐增大。双轴加载作用下(即 $\eta=0.5$)的 CCP 试样以及内压载荷作用下(IP)的薄壁管道,两者裂尖均呈现 I - II 复合型裂纹状态,裂尖拘束度曲线接近;两者结构裂尖的拘束度随着 K_{II} 分量的增加逐渐增加;但在裂纹倾斜角为 30° 和 60° 时,两者裂尖的复合程度有一定的差别,这主要是由 CCP 试样和管道试样在结构形状上的差别所引起的。

在上述研究分析的基础上,将图 5 中的 CCP 试样和管道结构分成 6 个部分进行比较分析。这 6 个部分



(a) 单轴加载
(a) Uniaxial loading



(b) 双轴加载
(b) Biaxial loading

图 5 拘束度 T' 关于裂尖复合程度的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve of constraint T' with crack tip mixed degree

所包含的点分别具有近似的复合程度、加载形式或者拘束度水平,各部分所包含点的参数情况如表 2 所示。

为方便表述,将不同部分对应的拘束度分别定义为 $T'_1 \sim T'_6$ 。具体分析将在本文第 4 节中进行阐述。

表 2 各部分参数情况汇总
Tab. 2 Summary of parameters of each part

图 Figure	部分 Part	裂纹类型 Crack type	复合程度 $K_{II}/(K_I+K_{II}+K_{III})$ Mixed degree $K_{II}/(K_I+K_{II}+K_{III})$	加载形式 Loading type	拘束度水平 T' Constraint level T'
5(a)	I	I 型 Mode I	0	单轴加载 ($\eta=0, TL$) Uniaxial loading ($\eta=0, TL$)	-120, -40 (T'_1)
	II	I 型 Mode I	0	单轴加载 ($\eta=0, TL$) Uniaxial loading ($\eta=0, TL$)	$+\infty$ (T'_2)
	III	I-II 复合型 I-II mixed mode	0.22~0.36	单轴加载 ($\eta=0, TL$) Uniaxial loading ($\eta=0, TL$)	-75 左右 (T'_3) Around the value of -75 (T'_3)
	IV	I 型 Mode I	0	双轴加载 ($\eta=0.5, IP$) Biaxial loading ($\eta=0.5, IP$)	不相同 (T'_4) Different (T'_4)
5(b)	V	I 型 Mode I	0	双轴加载 ($\eta=0.5, IP$) Biaxial loading ($\eta=0.5, IP$)	不相同 (T'_5) Different (T'_5)
	VI	I-II 复合型 I-II mixed mode	0.2~0.3	双轴加载 ($\eta=0.5, IP$) Biaxial loading ($\eta=0.5, IP$)	50 左右 (T'_6) Around the value of 50 (T'_6)

3 CCP 试样和含裂纹管道的 FAD 研究

第 3 次修订的 CEBG R6^{[14]40-51} 提供了建立 FAC 的 3 种选择,分别简称为选择 1 曲线、选择 2 曲线、选择 3 曲线,并提出了评定含缺陷结构的 3 种分析方法。其中,选择 3 曲线是在材料、结构尺寸、缺陷尺寸和加载方式确定下的 FAC,该方法基于有限元计算的 J 积分,精度最高。因此,本文的 FAC 采用基于选择 3 曲线的构建方法。其具体方法为

$$f(L_r) = \begin{cases} (J_e/J)^{1/2}, & 0 \leq L_r \leq L_r^{\max} \\ 0, & L_r > L_r^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中, L_r 为载荷比;截断线 L_r^{\max} 为载荷比的最大临界值。计算式分别为

$$L_r = \frac{P}{P_0} \quad (3)$$

$$L_r^{\max} = \frac{\sigma_t}{\sigma_y} \quad (4)$$

式中, σ_t 为单轴向流变应力; σ_y 为单轴 0.2% 屈服应力; P 为实际载荷; P_0 为以 σ_y 为基础的塑性极限载荷。

3.1 双轴加载作用 CCP 试样的 FAD 研究

3.1.1 裂纹倾斜角及试样厚度的影响

由于断裂参量存在厚度方向的三维效应^{[15]89-95},本文 CCP 试样的 J 积分取厚度方向的平均值作为 FAD 的纵坐标;试样的极限载荷值参照 ASME 标准^{[28]77-80},基于两倍弹性斜率法获得。将裂尖 J 积分以及极限载荷代入式(2)即可获得 FAD。图 6 给出了载荷比 $\eta = 0$ 和 $\eta = 0.5$ 作用下裂尖复合程度以及试样厚度对 FAD 的影响规律,其中 K_r 为 $(J_e/J)^{1/2}$ 。对于单轴加载作用下的 CCP 试样,除 $\beta = 90^\circ$ 的情况(裂尖无张开应力,试样的失效为极限载荷主导),裂尖的复合程度和试样厚度

对试样的 FAD 影响不大。对于 $\eta = 0.5$ 作用下的 CCP 试样,在加载的前期,倾斜角越大, FAC 越高;而在加载的后期,倾斜角越大, FAC 越低。这主要与裂尖不同加载阶段的受力和变形相关。

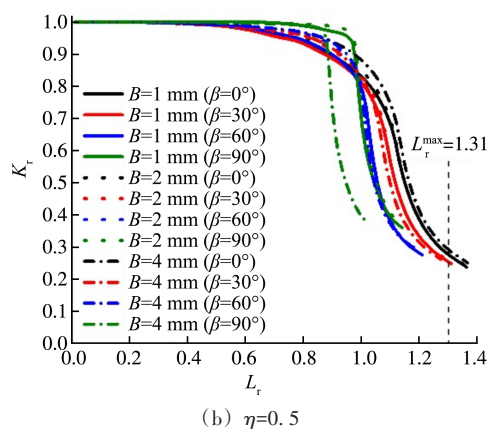
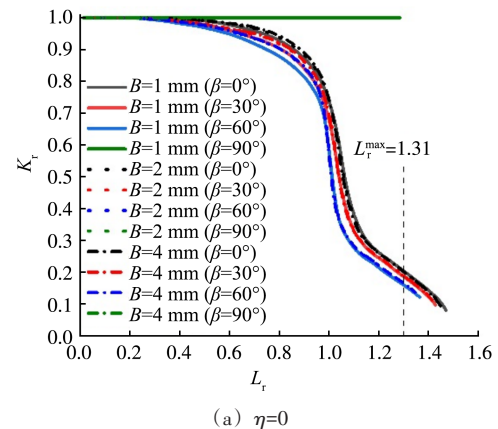


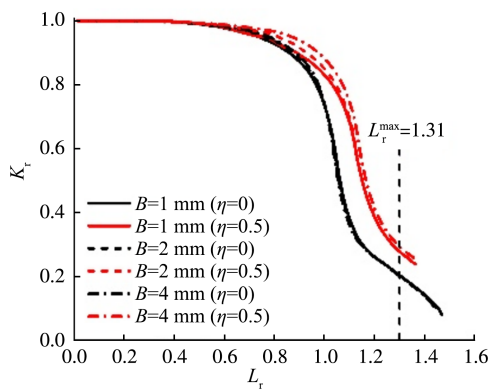
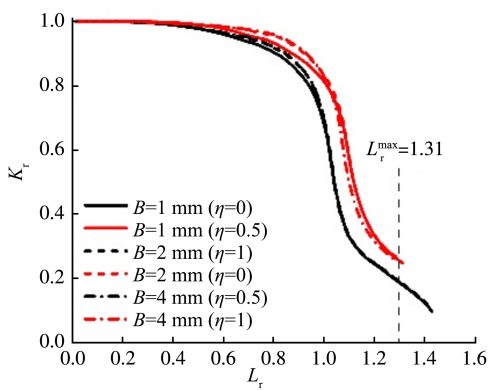
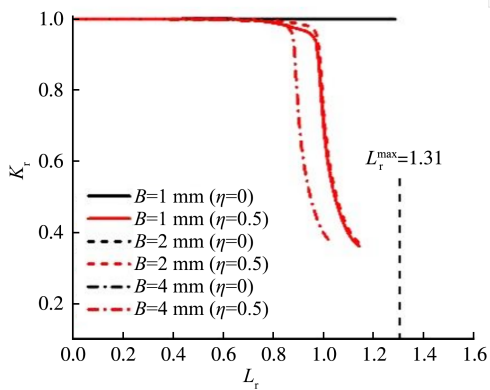
图 6 裂纹倾斜角及试样厚度对 CCP 试样 FAD 的影响

Fig. 6 Effects of crack inclined angle and thickness on FAD for CCP specimen

3.1.2 双轴加载比例的影响

图 7 为双轴载荷比 η 对 CCP 试样 FAD 的影响。

对于 $\beta = 0^\circ$ 的 CCP 试样[图 7(a)], 其裂尖呈现为 I 型裂纹状态; $\eta = 0.5$ 作用下的 FAC 高于单轴 $\eta = 0$ 作用下的 FAC。这一现象说明对于 I 型裂纹, 平行于裂纹方向的应力 σ_{xx} 可以有效降低结构的危险程度(需注意, 结构的安全性还需进一步结合断裂韧性及极限载荷综合考量)。这主要是因为应力 σ_{xx} 可降低由张开应力引起的张开变形, 而该变形是引起裂纹产生 I 型断裂失效的主要原因。对于复合型载荷($\beta = 30^\circ$)[图 7(b)], 同样表现为应力比越高, FAC 越高, 结构越安全。基于式(1)可知, 裂尖的 σ_{xx} 随着应力比的增加逐渐增加,

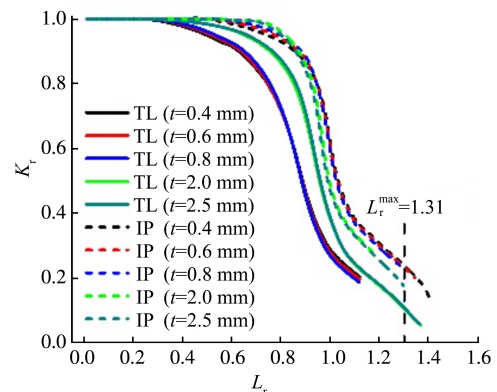
(a) $\beta=0^\circ$ (b) $\beta=30^\circ$ (c) $\beta=90^\circ$ 图 7 双轴加载比例 η 对 CCP 试样 FAD 的影响Fig. 7 Effects of biaxial loading ratio η on FAD for CCP specimen

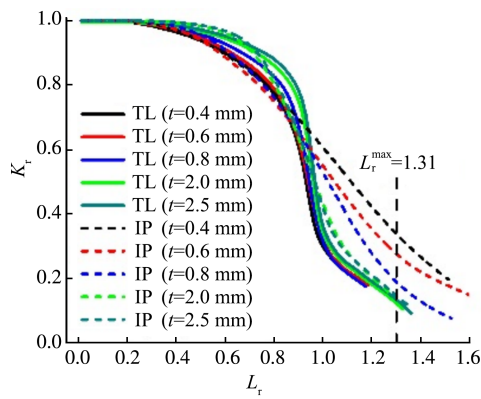
因此复合型裂纹 FAD 中, 应力比越高, 结构越安全的试验现象也与存在应力 σ_{xx} 相关。对于 $\beta = 90^\circ$ 的 CCP 试样[图 7(c)], 随着加载比例 η 的增大, FAC 逐渐下降; 当 $\beta = 90^\circ$, $\eta = 0$ 时, 试样由极限载荷主导, 裂尖不产生张开位移; 随着垂直于裂纹方向的力逐渐增大, 裂尖产生张开位移, 逐渐由极限载荷主导转为极限载荷和裂尖 J 积分共同主导。

3.2 含裂纹管道结构的 FAD 研究

3.2.1 管道壁厚及载荷类型的影响

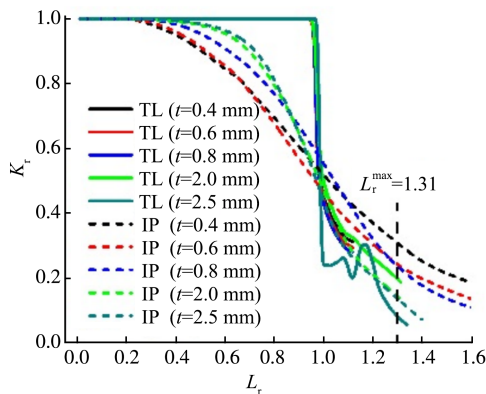
同理, 为考虑管道结构的三维效应, 本文中 FAD 中涉及到的 J 积分均取值为壁厚方向 J 积分的平均值; 参照 ASME 标准^{[28]77-80}, 基于两倍弹性斜率法获得了含裂纹管道的极限载荷^{[15]89-95}。管道壁厚及加载类型对承压管道 FAD 的影响如图 8 所示, 具体表现为: 倾斜角 $\beta' = 0^\circ$ 时呈现 I 型加载方式, 内压作用下的管道 FAC 高于拉伸载荷作用下的 FAC; 倾斜角 $\beta' = 60^\circ$ 和 90° 时, 呈现 I-II 复合型加载方式, 内压作用下的管道 FAC 先高于拉伸载荷 FAC, 然后逐渐变为低于拉伸载荷作用下的 FAC。产生这种现象的原因是内压载荷作用下的管道裂尖随着 β' 的增加平行于裂纹方向的 σ_{xx} 或 T' 逐渐降低, 而拉伸载荷作用下的管道裂纹随着 β' 的增加 σ_{xx} 或 T' 逐渐增加。拉伸载荷作用下管道的 FAD 与壁厚 t 的相关性随着 β' 的增大逐渐减小, 内压作用下管道的 FAD 与壁厚 t 的相关性则随着 β' 的增大逐渐增大, 这同样是受平行于裂纹方向的应力 σ_{xx} 的影响; 当 σ_{xx} 增大或者结构趋近于极限载荷主导时, FAD 与壁厚 t 的相关性变小。此外, 当管道 FAD 与壁厚相关时, 主要表现为: 若为薄壁管道 ($0.4 \text{ mm} \leq t \leq 0.8 \text{ mm}$) 及厚壁管道 ($2.0 \text{ mm} \leq t \leq 2.5 \text{ mm}$), 主要为薄壁管道与厚壁管道的影响; 而当管道壁厚处在薄壁/厚壁范围之间, 即 $0.8 \text{ mm} \leq t \leq 2.0 \text{ mm}$ 时, 壁厚的影响则很小。

(a) 环向裂纹 ($\beta'=0^\circ$)(a) Circumferential crack ($\beta'=0^\circ$)



(b) 倾斜裂纹($\beta' = 60^\circ$)

(b) Inclined crack ($\beta' = 60^\circ$)



(c) 轴向裂纹($\beta' = 90^\circ$)

(c) Axial crack ($\beta' = 90^\circ$)

图 8 承压管道的 FAD 比较

Fig. 8 Comparison of FAD of pressure pipe

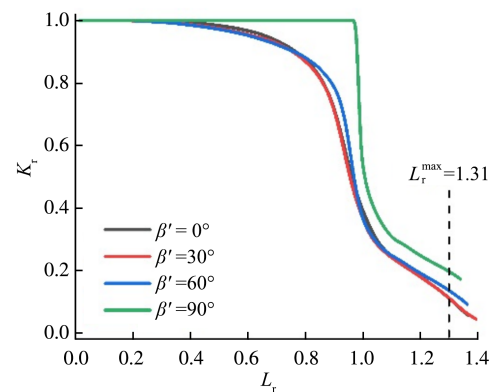
3.2.2 裂纹倾斜角度的影响

图 9(a)为裂纹倾斜角 β' 对拉伸载荷作用下管道 FAD 的影响规律图。其中, $\beta' = 90^\circ$ 的管道为极限载

荷主导,其 FAC 位于最上方;而其余管道的 FAC 则位于下方,各曲线之间差距不明显。图 9(b)为裂纹倾斜角 β' 对内压载荷作用下管道 FAD 的影响规律图。可以看到 FAC 随裂纹倾斜角 β' 的增大逐渐降低,这主要是因为裂纹倾斜角 β' 越大,平行于裂纹方向的应力 σ_{xx} 越高,进而裂纹张开应力降低,结构的危险系数降低。

4 比较分析

根据以上研究分析发现,平行于裂纹方向的应力 σ_{xx} 是双轴载荷作用下影响拘束度 T' 的主要原因,并且平行于裂纹方向的应力 σ_{xx} 在一定情况下可以有效降低结构的危险程度。为探讨 CCP 试样和管道结构的 FAD 之间的关联和区别,以及裂尖拘束度对 FAD 的影响,本节将通过 CCP 试样与承压管道的 FAD 进行对比分析,具体方案如表 3 所示,共分别进行 4 组对比分析。对比过程中确保裂尖复合型程度、加载方式相同(单、双轴)或者拘束度水平相同。



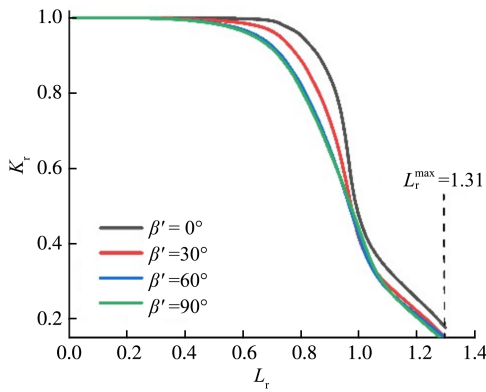
(a) 拉伸载荷($t = 2.5$ mm)

(a) Tensile load ($t = 2.5$ mm)

表 3 CCP 试样和管道结构 FAD 的比较分析方案

Tab. 3 Comparative analysis schemes of FADs of CCP specimens and pipeline

序号-图号 Serial number-figure number	加载方式 Loading type	裂纹 Crack	拘束度水平 Constraint level	研究对象 Research object
1-图 10(a) 1-Fig.10(a)	单轴(S) Uniaxial loading (S)	I 型 Mode I	T'_1	CCP, $\eta = 0, \beta = 0^\circ, t \in [1.0, 4.0]$ mm pipe, TL, $\beta' = 0^\circ, t \in [0.4, 2.5]$ mm
2-图 10(b) 2-Fig.10(b)	单轴(S) Uniaxial loading (S)	I - II 复合型 I - II mixed mode	T'_2 T'_3	CCP, $\eta = 0, \beta = 90^\circ, t \in [1.0, 4.0]$ mm pipe, TL, $\beta' = 90^\circ, t \in [0.4, 2.5]$ mm CCP, $\eta = 0, \beta = 30^\circ, t \in [1.0, 4.0]$ mm pipe, TL, $\beta' = 30^\circ, t \in [0.4, 2.5]$ mm
3-图 10(c) 3-Fig.10(c)	双轴(D) Biaxial loading (D)	I 型 Mode I	T'_4 T'_5	CCP, $\eta = 0.5, \beta = 0^\circ, t \in [1.0, 4.0]$ mm pipe, IP, $\beta' = 90^\circ, t \in [0.4, 2.5]$ mm CCP, $\eta = 0.5, \beta = 90^\circ, t \in [1.0, 4.0]$ mm pipe, IP, $\beta' = 0^\circ, t \in [0.4, 2.5]$ mm
4-图 10(d) 4-Fig.10(d)	双轴(D) Biaxial loading (D)	I - II 复合型 I - II mixed mode	T'_6	CCP, $\eta = 0.5, \beta = 0^\circ, t \in [1.0, 4.0]$ mm pipe, IP, $\beta' = 0^\circ, t \in [0.4, 2.5]$ mm

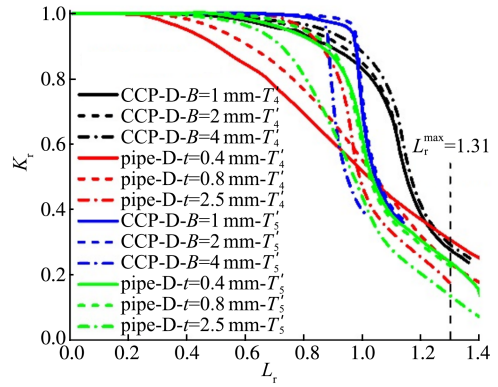


(b) 内压载荷 ($t=2.5\text{ mm}$)
(b) Inner pressure load ($t=2.5\text{ mm}$)

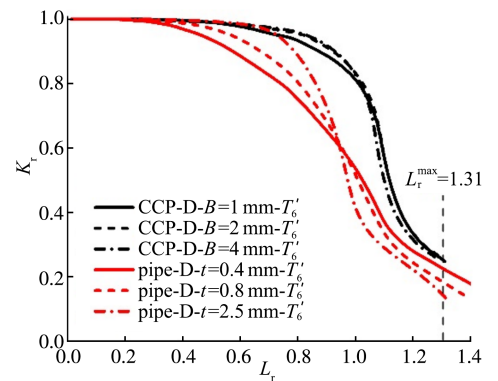
图9 裂纹倾斜角对管道FAD的影响

Fig. 9 Effects of crack inclined angle on FAD for pipe

基于表3的方案,图10为具有相同裂尖分量、相同载荷形式,以及相同裂尖拘束度的试样和管道结构的对比图。可以看到,对于I型裂纹或者I-II复合型裂纹,CCP试样的FAC均高于管道结构的FAC,这意味着采用CCP试样的FAC评定管道结构是不安全的。通过图10(c)可发现,当拘束度 T' 较高时($T'_5 > T'_4$),管道结构和平板试样的FAC之间差异较小。特别是当 T' 趋于 $+\infty$ 时[图10(a), T'_2],管道结构和CCP试样的FAD几乎一致;这主要是因为裂尖无张开应力,此时完全由极限载荷主导。以上现象说明,当裂尖拘束度



(c) 双轴加载(I型裂纹)
(c) Biaxial loading (mode I crack)



(d) 双轴加载(I-II复合型裂纹)
(d) Biaxial loading (I-II mixed mode crack)

图10 CCP试样和管道结构FAD的比较

Fig. 10 Comparison of FADs between CCP specimen and pipe

较低时,即使结构裂尖的拘束度一致,结构的FAD仍与结构的具体形状相关;而当裂尖拘束度较高时,由于裂尖张开力较小,结构主要为极限载荷主导,其FAD与结构形状的相关性较小。

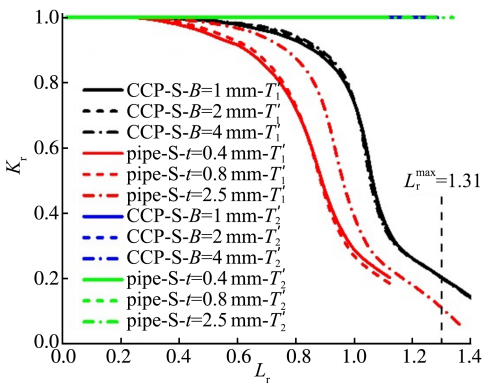
此外还需注意,薄壁管道和厚壁管道的FAD受壁厚的影响不同;结构的FAD与壁厚和结构形状等均相关,其中结构形状的影响要大于壁厚的影响。

5 结论

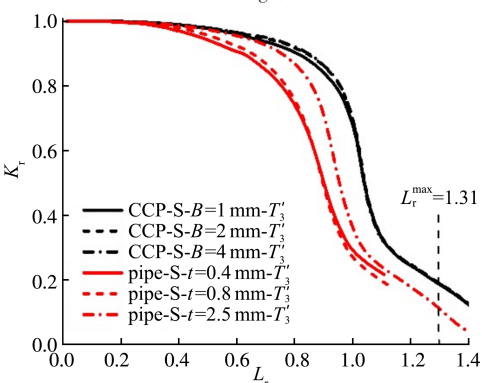
本文围绕含裂纹的平板试样和管道结构,对其裂尖拘束度以及FAD进行了系统地研究,获得了裂尖拘束度以及FAD的影响因素及变化规律,同时研究了平板试样和管道结构两者的适配性及关联性,主要研究结论如下:

1)在双轴载荷作用下,平行于裂纹方向的应力 σ_{xx} 是裂尖产生拘束度差异的主要因素。单轴加载作用下的CCP试样($\eta = 0$)的裂尖拘束度与拉伸载荷作用下的厚壁管道($t > 0.8\text{ mm}$)基本一致;而双轴加载作用下的CCP试样($\eta = 0.5$)的裂尖拘束度则与薄壁管道($t < 0.8\text{ mm}$)基本一致。

2)CCP试样和管道结构的FAD与裂尖复合程度、



(a) 单轴加载(I型裂纹)
(a) Uniaxial loading (mode I crack)



(b) 单轴加载(I-II复合型裂纹)
(b) Uniaxial loading (I-II mixed mode crack)

应力比以及试样厚度相关,主要表现为:单轴载荷作用下(除极限载荷主导的情况外),FAD与裂尖复合程度以及试样厚度的相关性较小。双轴加载作用下,II型比例越高,FAC越高,结构越安全。即应力比越大,或平行于裂纹方向的应力越高,FAC越高。CCP试样FAD与壁厚相关性较小,而管道结构的FAD则与薄壁管道和厚壁管道的壁厚相关。

3)对于具有相同裂尖分量、相同载荷形式以及相同裂尖拘束度的CCP试样和管道结构,CCP试样的FAC均高于管道结构的FAC,即采用CCP试样的FAD评定管道结构是不安全的。当拘束度 T' 较高时,管道结构和CCP试样FAD之间的差异较小,其主要原因就是平行于裂纹面的应力降低了裂纹张开力,使得结构逐渐趋于极限载荷主导。

参考文献(References)

- [1] 方新文,管佳佳. TC4钛合金在准静态拉伸下的本构模型及失效参数[J]. 机械强度,2022,44(4):831-836.
FANG Xinwen, GUAN Jiajia. Constitutive model and failure parameters of TC4 titanium under quasi-static tensile [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 831-836. (In Chinese)
- [2] 张博文,万正权,张爱锋,等. 应力三轴度对TA31钛合金失效行为的影响研究[J]. 船舶力学,2022,26(10):1485-1495.
ZHANG Bowen, WAN Zhengquan, ZHANG Aifeng, et al. Effect of stress triaxiality on the failure behavior of TA31 titanium alloy [J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(10): 1485-1495. (In Chinese)
- [3] 杨杰,刘玉嫚,吴凡. 不同实验室试样间拘束度的匹配性研究[J]. 机械强度,2019,41(6):1308-1314.
YANG Jie, LIU Yuman, WU Fan. Study on the matching of crack-tip constraints among different laboratory specimens [J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(6): 1308-1314. (In Chinese)
- [4] WILLIAMS M L. On the stress distribution at the base of a stationary crack[J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 24(1): 109-114.
- [5] O'DOWD N P, SHIH C F. Family of crack-tip fields characterized by a triaxiality parameter—I. Structure of fields[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1991, 39(8): 989-1015.
- [6] YANG J, WANG G Z, XUAN F Z, et al. Unified correlation of in-plane and out-of-plane constraint with fracture resistance of a dissimilar metal welded joint[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 115: 296-307.
- [7] YANG S, CHAO Y J, SUTTON M A. Higher order asymptotic crack tip fields in a power-law hardening material[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1993, 45(1): 1-20.
- [8] GUO W. Three-dimensional analyses of plastic constraint for through-thickness cracked bodies[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 62(4/5): 383-407.
- [9] ZHAO J H, GUO W L, SHE C M. The in-plane and out-of-plane stress constraint factors and K-T-Tz description of stress field near the border of a semi-elliptical surface crack[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(3): 435-443.
- [10] NAZARALI Q, WANG X. The effect of T -stress on crack-tip plastic zones under mixed-mode loading conditions[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2011, 34(10): 792-803.
- [11] 缪新婷. I型及I-II复合型裂纹拘束度及断裂行为研究[D]. 南京:南京工业大学,2019:1-12.
MIAO Xinting. Study on constraint and fracture behavior of mode I and I-II mixed mode cracks[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2019: 1-12. (In Chinese)
- [12] MIAO X T, ZHOU C Y, HE X H. In-plane and out-of-plane constraint for single edge notched bending specimen and cruciform specimen under uniaxial and biaxial loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 40(12): 1945-1959.
- [13] MIAO X T, JIANG C Y, ZHOU C Y, et al. Effects of specimen type and thickness on elastic and elastic-plastic fracture parameters for I-II and I-III mixed mode cracks[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 115: 103042.
- [14] WU D Q, JING H Y, XU L Y, et al. Numerical analysis of the creep crack constraint effects and the creep crack initiation for pressurized pipelines with circumferential surface cracks[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 115: 40-51.
- [15] 王良军,李强,王东坡,等. 利用拘束度耦合模型计算管道焊接残余应力[J]. 天然气工业,2016,36(11): 89-95.
WANG Liangjun, LI Qiang, WANG Dongpo, et al. Calculation of pipeline welding residual stress by using the restraint coupling model[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(11): 89-95. (In Chinese)
- [16] British Energy Ltd. R/H/R6: Assessment of the integrity of structures containing defects: R6 Revision 4, with amendments [S]. Gloucester: [s. n.], 2006: 3-104.
- [17] British Steel, RUG, UC. Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry [S]. Rotherham: British Steel plc, 1999: 81-114.
- [18] British Standard Institution. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures [S]. London: [s. n.], 2013: 113-124.
- [19] The American Society of Mechanical Engineers. API 579-1/ASME FFS-1-2007 Fitness-for-Service [S]. Washington D. C. : American Petroleum Institute, 2007: 1-29.
- [20] KOCAK M, WEBSTER S, JANOSCH J J, et al. Fitnet fitness-for-service (FFS) procedure: volume 1, revision mk8 [M]. Geesthacht: GKSS Research Centre, 2008: 94-105.
- [21] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 在用含缺陷压力容器安全评定: GB/T 19624—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 2-91.
China Standardization Committee on boilers and Pressure Vessels. Safety assessment of in-service pressure vessels containing defects: GB/T 19624—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019:

- 2-91. (In Chinese)
- [22] WANG X, SHUAI J, LV Z Y. Study on FAD curves of steel pipes based on stress-strain curves[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 106:102451.
- [23] WANG Y H, WANG G Z, TU S T, et al. Unified constraint-based FAD assessments for ductile fracture in cracked pipes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020, 185:104132.
- [24] CICERO S, AINSWORTH R A, GUTIÉRREZ-SOLANA F. Engineering approaches for the assessment of low constraint fracture conditions: a critical review [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(8):1360-1374.
- [25] JIN H J, WU S J. Effect of plasticity constraint on structural integrity assessment of pressure vessel welds[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2015, 134:72-81.
- [26] MU M Y, WANG G Z, XUAN F Z, et al. Fracture assessment based on unified constraint parameter for pressurized pipes with circumferential surface cracks [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 175:201-218.
- [27] YU H J, WU L Z, GUO L C, et al. Investigation of mixed-mode stress intensity factors for nonhomogeneous materials using an interaction integral method[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(20):3710-3724.
- [28] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Nuclear Inservice Inspection. Rules for inservice inspection of nuclear power plant components: section XI [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2002:77-80.

Study on constraint of mixed mode crack and failure assessment diagram of pressure-bearing structure

MIAO Xinting^{1,2} LIU Guoxu¹ ZHANG Jinbo¹ PENG Jian^{1,2} BIE Fengfeng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

(2. Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The crack tip constraint and failure assessment diagram (FAD) in both plate specimen and pipe structure were studied to find out the compatibility and correlation of between the sample and pipe. Based on the finite element method, constraints at crack tip of central cracked plate (CCP) specimen and cracked pressure pipe were obtained. It was found that crack tip constraint of CCP specimen under uniaxial loading is better matched with thick-walled pipeline under axial tensile loading, while CCP specimen under biaxial loading is better matched with thin-walled pipeline under internal pressure. In addition, the failure assessment diagram of CCP specimen and pipeline were obtained. It was found that FAD of CCP specimen is less related with thickness, when the thickness of pipe is within the range of thick wall or thin wall; was also pointed out that stress parallel to the crack direction increases the failure assessment curve (FAC) of the structure. Finally, it is found that FAC of the central crack plate specimen is higher than that of the pressure bearing pipeline, for the two structures with the same constraint level, and crack tip mixed mode degree and loading mode. That is, it is unsafe to use FAD of CCP specimen to evaluate pipeline.

Key words: Mixed mode crack; Constraint; Failure assessment diagram; Pressure structure

Corresponding author: MIAO Xinting, E-mail: xintingmiao@163.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (52105141, 52075050); Natural Science Research of Jiangsu Higher Education Institutions of China (21KJB460002); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX24_1659); Science and Technology Planproject of Changzhou (CJ20200080)

Received: 2023-04-11 Revised: 2023-07-21