

管道大范围屈服断裂评估的研究现状与进展*

韩克江¹ 帅健^{1,†} 王俊强¹ 霍春勇²

¹ 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

² 中国石油天然气集团公司石油管工程技术研究院, 西安 710065

摘要 高强度、高韧性管材的大量应用, 提出管道大范围屈服断裂问题. 针对现有的断裂力学方法应用于管道大范围屈服断裂评估的局限性, 分别从双参数断裂力学、基于约束校正的断裂韧性测试、基于应变的断裂评估和基于应变的失效评估图 4 个方面详细地介绍了管道大范围屈服断裂评估的研究现状. 指出目前基于约束校正的管道断裂韧性测试的主要方法是 SENT 试件方法和表观断裂韧性方法, 评述了基于 SENT 试件约束校正的断裂评估研究现状及存在的问题. 阐述了基于应变断裂评估的基本原理, 并从驱动力方程和 CTOD 失效准则两方面介绍了基于应变的断裂评估方法的研究工作成果. 最后提出了需要进一步研究的问题.

关键词 大范围屈服, 管道, 断裂评估, 基于应变, 失效准则

1 引言

近年来, 随着“西气东输”等一批重要长输油气管道的建成与投产, 我国迎来了油气管道建设的高潮, 与早期建设的油气管道相比, 新建油气管道普遍采用了高强度、高韧性管材, 如 X70、X80, 更高强度级别的管材 X100、X120 也在开发之中. 这些高强度、高韧性管材的应用, 大大提高了油气管道的运行压力, 也增强了管道抵御环境土体变形的能力, 因而某些情形下允许管道产生一定的塑性变形, 然而这超出了传统管道设计规范或标准的要求, 此外, 由于管道建设的巨大成本, 现在对充分利用管材屈服后性能的呼声越来越高, 因此, 提出了管道大范围屈服断裂评估问题.

现有的断裂评估方法(如 R 6^[1] 和 BS 7910^[2] 等)用于管道大范围屈服断裂评估时存在一定的局限性, 主要体现在以下几个方面: 其一, 目前的断裂评估方法主要是针对载荷控制的情况, 这意味着在分析中采用应力作为输入参数, 但在塑性变形阶段, 应力的微小变化可能导致应变水平显著变化, 从而引起断裂参数显著变化, 因而大范围屈服条件下的断裂评估采用应力作为输入参数不

一定合适; 其二, 现有的断裂评定要求拉伸应变在 0.3%~0.5% 以下, 限制了对高强度、高韧性管材屈服后材料性能的利用; 其三, 管材的断裂韧性通常由标准的断裂力学试件获得, 如 $a/W = 0.5$ 的三点弯 (SENB) 或紧凑拉伸 (CT) 试件, 与管道裂纹相比, 这两种试件的裂纹尖端均具有高的约束度, 因而采用标准断裂力学试件测试的断裂韧性可能低估了管道抵抗断裂的能力^[3]; 其四, 用于断裂评估的塑性失稳准则认为, 当净截面应力等于流动应力(屈服强度和拉伸强度的平均值)时即塑性失稳, 而在实际工程中, 存在管道承受的应变所对应的管道轴向应力明显大于流动应力的情况, 如海底管道卷轴铺设时最大应变可达 2%~3%, 这就意味着: 即使在没有裂纹的情况下, 管道所受到的应力也已经超过了塑性失稳准则, 所以塑性失稳准则也可能存在一定的保守性. 基于上述原因, 希望改进现有的管道断裂评估方法, 或提出一种新的计算策略, 能够可靠和准确地对大范围屈服条件下含缺陷管道进行断裂评估.

本文从以下 4 个方面对管道大范围屈服断裂评估方法进行综述: (1) 双参数断裂力学; (2) 基于约束校正的断裂韧性测试; (3) 基于应变的管道断

收稿日期: 2011-07-26, 修回日期: 2011-09-28

* 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20100007110006) 资助

† E-mail: Shuaij@cup.edu.cn

裂评估方法; (4) 基于失效评估图的管道断裂评估方法, 分析管道大范围屈服断裂评估方法的研究现状与存在的问题, 指出进一步的发展方向.

2 双参数断裂力学

在工程临界评估 (engineering critical assessment, ECA) 中占主要地位的单参数断裂力学理论假设: 小范围屈服条件下, 即裂纹尖端的塑性区域与结构或试件尺寸相比很小, 单参数应力强度因子 K 和 J 积分可用来表征裂纹尖端的应力/应变场; 从小尺寸试件测得的断裂韧性值可以转换到结构中应用, 而不依赖于试件的几何构形和加载方式.

研究表明^[4-5] 试件几何构形及加载方式影响断裂韧性的测试结果, 使得断裂韧性或裂纹扩展阻力不再是一个材料常数, 特别是大范围屈服条件下的断裂韧性与裂纹尖端的约束水平密切相关. 随着塑性变形的增加, 裂纹尖端的三轴应力水平不断降低, 其应力状态也较大程度地偏离 HRR 奇异场, 单断裂力学参数已经不能表征特大范围屈服条件下的裂纹尖端的应力/应变场, 例如, 受到拉伸载荷的含表面裂纹管道和含中心裂纹的薄板, 此种条件被称为“约束损失”或低约束条件. 因此, 引入约束参数 (第二个断裂力学参数) 表征约束对裂纹尖端场的作用, 也称为双参数断裂力学.

在线弹性断裂力学中, 采用 T 应力表征试件的几何形状和加载方式的影响

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + T\delta_{1i}\delta_{1j} \quad (1)$$

式中, (r, θ) 是以裂纹尖端为原点的极坐标; K_I 是 I 型裂纹的应力强度因子; $f_{ij}(\theta)$ 是无量纲函数; T 应力是平行于裂纹面的均匀应力. 对于一些结构比较简单的问题, T 应力也可通过无量纲应力双轴比 β 来表达

$$\beta = \frac{T\sqrt{\pi a}}{K_I} \quad (2)$$

K - T 方法最初被用于表征线弹性材料裂纹尖端应力场的约束水平, 但是部分研究人员认为 K - T 方法也可以应用于塑性变形条件^[6-7], 表征小范围屈服到中范围屈服条件下的裂纹尖端应力/应变场. 但当裂纹尖端进入大范围屈服时, T 应力将失去意义.

对不同裂纹构件, O'Dowd 和 Shih^[8-9] 发现, 裂纹尖端 $J/\sigma_s \leq r \leq 5J/\sigma_s$ 区域内的全应力场解 σ_{ij}

和 HRR 场 σ_{ij}^{HRR} 应力场之间的差别为一个静水压力值

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{\text{ref}} + \sigma_0 Q \delta_{ij} \quad (3)$$

式中, σ_{ij}^{ref} 是具有高应力三轴度的参考应力场, 可以是 HRR 场或小范围屈服 (SSY) 解; σ_0 是屈服应力. 由于一般工程材料不一定遵循幂硬化规律, 而选择 K 控制的裂纹尖端应力场作为参考应力场更加合适, 因此, O'Dowd 和 Shih^[10] 随后将 Q 参数定义为

$$Q = \frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\theta\theta}^{\text{SSY}}}{\sigma_0} \quad (\text{在 } \theta = 0, r = 2J/\sigma_0 \text{ 处}) \quad (4)$$

式中, $\sigma_{\theta\theta}$ 是实际结构裂纹的张开应力; $\sigma_{\theta\theta}^{\text{SSY}}$ 是小范围屈服条件下裂纹的张开应力.

J - Q 方法被大部分研究人员所采用, Nyhus^[11]、Thaulow 等^[12] 和 Xu 等^[13] 均采用 J - Q 方法定量评估在大范围屈服情况下管道和 SENT 试件的裂纹尖端约束水平. 然而 J - Q 方法中的 Q 参数强烈依赖于载荷, 当试件或结构中的裂纹扩展时, 具有良好延展性的材料发生大范围屈服时裂纹尖端的 Q 值随载荷不断变化, 这使得采用 Q 参数分析裂纹起裂或扩展问题时也存在一定程度的不足.

基于取应力函数的前三阶展开式, Yang 和 Chao^[14-16] 提出 J - A_2 方法. 在平面应变条件下前三阶应力场可表达为

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0} = A_1 \left[\left(\frac{r}{L} \right)^{s_1} \tilde{\sigma}_{ij}^{(1)}(\theta) + A_2 \left(\frac{r}{L} \right)^{s_2} \tilde{\sigma}_{ij}^{(2)}(\theta) + A_2^2 \left(\frac{r}{L} \right)^{s_3} \tilde{\sigma}_{ij}^{(3)}(\theta) \right] \quad (5)$$

式中, $\tilde{\sigma}_{ij}^{(k)}(\theta)$ ($k = 1, 2, 3$) 是无量纲角函数; 应力指数 s_k 依赖于强化指数 n , 而不依赖于其它材料参数 (例如屈服应变和屈服应力等); L 为特征长度, 一般取 $L = 1 \text{ mm}$; A_1 和 s_1 是 HRR 场的相关参数, 其表达式为

$$A_1 = \left(\frac{J}{\alpha \varepsilon_s \sigma_s I_n L} \right)^{-s_1}, \quad s_1 = -\frac{1}{n+1} \quad (6)$$

王钟羨^[17] 对 J - A_2 方法的研究发现: A_2 匹配点的位置和载荷对 A_2 的影响不是很大; 在相同的裂纹几何情况下, 由于加载方式不同而产生的约束参数 A_2 的改变量在不同 J 积分水平下基本相同. 通过对 SENT 试件进行加载设计, 用不同的偏心载荷来模拟各种载荷形式和约束水平, 给出了偏心距与约束参数 A_2 的关系. 由此, 可以在实验室里模拟结构的约束, 用实验结果来预测实际结构的断裂行为.

然而 $J-Q$ 和 $J-A_2$ 方法适用于分析解理断裂的约束条件, 因为仅仅考虑了约束对裂纹尖端应力场的影响, 而没有考虑塑性变形对韧性撕裂的影响. 裂纹的稳定扩展可分为空穴成核、增长和聚集三个过程, 而空穴增长率跟塑性变形率成正比例关系. McClintock^[18] 和 Rice 等^[19] 发现空穴增长与 $\exp(3\sigma^\infty/2\sigma_0)$ 成正比, 其中 σ^∞ 和 σ_0 是远场的静水压力和屈服应力. 因此 Brocks 和 Schmitt 提出采用 h 参数来表达韧性撕裂的约束水平

$$h = \frac{\sigma_h}{\sigma_e} \quad (7)$$

式中, σ_h 为静水压力; σ_e 为 von Mises 等效应力.

3 基于约束校正的管道断裂韧性测试

常用的钢材断裂性能测试试件是具有深裂纹 ($a/W = 5$) 的 SENB 和 CT 试件, 目的是为确保裂纹尖端产生比较高的约束. 然而管道在制造或使用过程中产生的缺陷通常是具有较低约束的表面裂纹, 例如, 腐蚀缺陷、非金属夹杂物和焊缝裂纹等. 将高约束的试件测得的断裂韧性用于含缺陷管道的断裂评估, 低估了管材抵抗断裂的能力, 将导致评价结果保守. 图 1 是裂纹尖端约束水平对断裂韧性影响的示意图, 从图 1 中可以看出, 断裂韧性随着试件约束水平增加而降低. SENB 或 CT 试件约束水平远远大于管道的约束水平, 而 SENT 试件的约束水平接近于管道, 所以 SENB 或 CT 试件的断裂韧性远远低于管道的断裂韧性, 而通过 SENT 试件获取的断裂韧性接近于管道的断裂韧性.

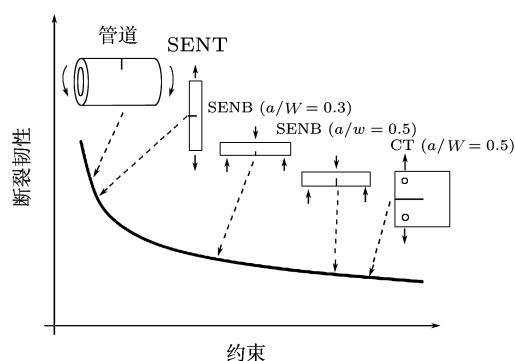


图 1 约束对断裂韧性影响的示意图

大范围屈服条件下管道的断裂性能测试方法有: 全尺寸实验、宽板实验、SENT 试件、表观断裂韧性法和 CTOA 测试方法等. 一些研究人员通

过全尺寸实验^[20-21]和宽板实验^[22-23]测试管道断裂性能和应变能力, 这两种实验方法与管道的实际受载情况较为接近, 但由于全尺寸和宽板实验对实验设备的要求较高, 不易大范围推广. 因此, 采用更精确的约束校正方法, 通过小试件实验直接测试或转变成工程断裂评估中所需要的实际裂纹构件的断裂参数, 具有十分重要的实际意义. 目前基于约束校正的管道断裂韧性测试主要有两种方法: 基于 SENT 试件的断裂韧性测试和表观断裂韧性转换程序.

3.1 基于 SENT 试件的断裂韧性测试

(1) 可行性研究

Chiesa 等^[24] 基于 T 应力研究了 SENT 试件用于管道断裂评估的可行性, 认为通过改变裂纹深度和夹具的距离, SENT 试件可具有与管道表面或穿透裂纹相当的约束水平, 由 SENT 试件测得的断裂韧性可用于管道断裂评估中; 同时认为 SENT 试件可以大大降低标准高约束试件的保守性, 使断裂评估更加有效和准确. Nyhus^[11] 和 Cravero 等^[25] 基于 $J-Q$ 方法研究了 SENT 试件替换 SENB 试件进行断裂韧性测试的可行性; 尽管与管道的实际断裂韧性相比, SENT 试件的断裂韧性值也是保守的, 但是与 SENB 试件相比, SENT 试件约束水平更接近于管道模型的约束水平.

(2) SENT 试件尺寸和应用范围的研究

Wästberg 等^[26] 发现只要 SENT 试件的裂纹深度比管道实际裂纹深, 采用 SENT 试件测试的断裂韧性就是安全的. 推荐的试件几何尺寸为: SENT 试件宽度 W 等于管道壁厚 t 、厚度 B 为 $2W$ 、试件长度为 $10W$. 随后 Nyhus 等^[27] 实验研究了裂纹深度和非对称几何形状对韧性撕裂阻力的影响. 研究发现非对称几何形状可减少断裂韧性, 但影响很小, 在断裂评估中可忽略不计; SENT 试件有效裂纹深度可以延长至管道壁厚的 50%; 推荐的标准测试尺寸为 $a/W = 0.3$. 针对海底管道的大塑性变形, DNV-RP-F108^[28] 推荐采用 SENT 试件测试断裂韧性, 试件尺寸和 Wästberg 推荐的相同, 而裂纹深度 a 等于管道的实际裂纹深度; 当 $0.2 \leq a/W \leq 0.5$ 时, 试件对预制裂纹不敏感, 在断裂韧性测试时可以不采用预制裂纹.

SENT 最初被认为仅可用于安装过程中管道的断裂评估, 而不能用于运行条件下管道的断裂评估, 这是因为运行条件下的管道存在轴向载荷和内压的组合, 这种双轴载荷增加了管道环向裂

纹的约束,且增加的约束可能会改变断裂机理(从韧性撕裂到解理断裂).然而, Nyhus 等^[27]和 Xu 等^[29]通过有限元数值模拟表明内压几乎不影响管道的裂纹扩展阻力曲线, Garwood 等^[30]和 Østby 等^[31]分别通过宽板和全尺寸管道实验也证明双轴载荷对裂纹扩展阻力曲线没有明显的影响. DNV OS F101^[32]和 RP-F108 均推荐 SENT 可用于运行条件下管道的断裂评估.

(3) SENT 断裂韧性的测试和表达方法

最近, 研究人员进行了一系列的研究, 提出了几种 SENT 试件的断裂韧性测试程序. 按照断裂韧性的表达方式可分为 J 积分和 CTOD 方法.

在 J 积分方法中, 主要是针对夹持式 SENT 试件的 CANMET^[33]和 DNV RP-F108 测试程序, 以及 Cravero 等^[34]提出的针对销钉式 SENT 试件的卸载柔度法, 其中 CANMET 和 Cravero 方法均为单试件测试方法, 而 DNV RP-F108 为多试件方法. DNV RP-F108 中 J 积分计算方程主要是针对均质材料, 而不能用于非均质材料(如焊接缺陷). DNV RP-F108 中采用 0.8 的安全系数以包含母材与焊接材料的不匹配和加工硬化的影响. 由于 J 积分是基于静态裂纹的, 为保证 J 积分的有效性, DNV RP-F108 限制裂纹的最大扩展长度为 3 mm. 而 Cravero 和 CANMET 两种方法克服 DNV RP-F108 测试方法的这种局限性. CANMET 的柔度和转动因子在 $0.05 \leq a/W \leq 0.7$ 的范围内是可靠的. Cravero 和 CANMET 方法为 SENT 断裂韧性测试标准的制定打下了坚实基础.

对于 CTOD 方法, Østby 等^[35]提出了一种新的裂纹扩展阻力曲线测试技术——硅树脂复制技术, 在不同载荷水平下停止加载, 并制作当时裂纹形状的硅树脂复制品, 通过比较初始裂纹与当前裂纹的尺寸以测量出 CTOD-R 裂纹扩展阻力曲线. Tang 等^[36]提出一种单试件柔度法测量 CTOD-R 裂纹扩展阻力曲线, 其中通过双引伸计方法测量 CTOD 值, 而裂纹扩展长度是通过 Cravero 方法中的卸载柔度法估计. DNV F101 提出将 J 积分值转换为 CTOD 值的方程, 然而此方程是针对 SENB 试件的, 而不是 SENT 试件, 因此采用此方法获取的 CTOD 值是保守的.

(4) SENT 断裂韧性测试方法的优点及存在的问题

采用 SENT 试件测试管道断裂韧性具有如下的优点: SENT 试件可以被设计成具有与管道裂纹相似的约束水平, 而且 SENT 试件的裂纹尖端应

力应变场与管道裂纹的情况相似, 这就说明 SENT 试件与含裂纹管道的断裂机制和断裂韧性是相同的; SENT 试件与含环向缺陷管道的载荷加载方式是类似的, 如果裂纹尺寸相同, 不仅裂纹尖端的应力/应变场相似, 而且整个韧带的塑性变形也相似; SENT 试件的加工和测试成本与 SENB 试件基本相同, 而且从 SENT 试件得到的极限载荷可被用来计算管道的塑性失稳载荷.

部分学者^[36]主张采用基于 CTOD 的断裂韧性测试方法, 主要归因于 J 积分在大塑性变形条件下的局限性. 对于弹塑性体而言, J 积分只有在全量理论和单调加载的条件下才成立, 而管道在大塑性变形时, 明显的裂纹增长能引起裂纹尖端的卸载; 同时在裂纹尖端的空洞聚集可能导致裂纹尖端应力场偏离了奇异性假设, 这恰恰是 J 积分的基础; 而几何参数 CTOD 是裂纹尖端的物理变形并可以直接测量出来, 而不依赖于经典断裂力学概念的数学推导. 但是 Østby 等^[37]却发现 J 积分区域在远离高度非比例加载区域时或多或少地不依赖于积分路径. 因此, 有必要进一步研究 J 积分在大范围屈服条件下的适用性.

Wästberg 已经证明采用 SENT 试件测试断裂韧性是安全和可靠的, 然而其研究均是针对受到拉伸载荷的管道. Nikzad 等^[38]通过有限元模拟发现 SENT 试件的断裂韧性高于受弯曲载荷管道的断裂韧性. 因此采用 SENT 试件测试受到弯曲载荷条件管道的断裂韧性是否可行有待进一步研究. SENT 断裂韧性测试的另一个问题是: 焊缝及其热影响区 (HAZ) 的裂纹扩展是非平面的, 这主要是归因于焊缝金属的强度高于母材. 然而, 无论是基于 J 积分还是 CTOD 的断裂韧性确定方程, 均是基于 I 型裂纹扩展, 对于非平面裂纹扩展, 这些方法都不一定可靠.

3.2 表观断裂韧度

前已述及, 断裂韧性主要通过标准的 SENB 试件测得, 由于采用高约束的试件将得到保守的断裂韧性值, 不利于充分利用管材性能. 基于此, Wang 等^[39-40]提出表观断裂韧度的概念, 表观断裂韧度是指在低约束条件下或从标准化的高约束条件下校正到低约束条件的韧度, 上述低约束条件是指管道承受轴向应变时的典型载荷条件. 表观韧度的计算方法主要有两种: 一是由标准高约束试件的断裂韧度计算, 二是通过 SENT 试件的 CTOD 裂纹扩展阻力曲线计算表观韧度.

Wang 等^[41]提出如果仅能得到高约束试件的断裂韧性数据,如标准的 SENB 试件测试的断裂韧性,可以通过转换系数方法将高约束试件的断裂韧性转换为表观断裂韧性.通过收集大量的实验数据,Wang 提出断裂韧性转换系数在 2~3 的范围内是合理的^[42].在使用转换系数时,应该注意高约束测试结果的有效性.与应力强度因子 K 和 J 积分测试相反,CTOD 的测试程序没有测试数据有效性的要求,但是在严格的断裂力学意义上,这个要求是必要的,以保证测试的断裂韧性代表裂纹尖端应力/应变场.CSA Z662-07^[43]附录 C 中提出表观断裂韧性的计算方法:在标准高约束试件测试后将不合格的断裂韧性值(CTOD)剔除,表观韧性取剩余断裂韧性数据中 3 倍最小值与 2 倍平均值中的最小值.标准高约束 CTOD 韧性到表观 CTOD 韧性的转换系数是基于经验的,它们基于对大量测试数据的观察,转换因子的详细讨论见文献^[44].在日本焊接工程学会技术报告^[45]中,给出的从高约束到低约束的 CTOD 韧性转换系数为 2.5.然而,这个“系数”依赖于材料和断裂过程.实验测试表明,约束作用在裂纹起裂时,对韧性破坏的影响很小,但随着裂纹韧性撕裂而增加^[46-47].

Liu 等^[48]提出了表观 CTOD 阻力曲线(CTOD_A)的概念,并提出如何采用 SENT 试件 CTOD_R 曲线确定表观断裂韧性 CTOD_A 的计算

方法. CTOD_A 的值依赖于设定的临界事件,这个临界事件可以为裂纹起裂、不稳定扩展或裂纹平面的起始失效.

3.3 CTOA (crack tip opening angle)

裂纹尖端张开角(CTOA)将裂纹尖端上下断面的夹角(CTOA)作为描述稳态裂纹扩展参数,其最早由 Andersson^[49]和 De Koning^[50]提出并已在核电站管道和航天工业上均得到广泛应用.大量的断裂试验和数值模拟发现裂纹经过短距离的非稳态扩展后,将进入稳态扩展区,此时 CTOA 保持为常值.由于裂纹尖端的约束水平与试件的厚度有关,对于同一材料不同厚度试样,稳态 CTOA 值并不相同,即 CTOA 与试样厚度相关.Mahmoud 等^[51]在铝合金材料的断裂试验研究中发现,随着试样厚度增加,稳态 CTOA 值降低.然而,Wang 等^[52]在管道钢撕裂试验中发现,随厚度增长稳态 CTOA 值反而有上升趋势.管道钢稳态 CTOA 值的影响因素仍需进一步研究,包括试件类型、几何尺寸、裂尖约束以及加载速率等.

为了满足薄壁结构的断裂韧性测试要求,ISO 和 ASTM 先后发布新的测试标准 ISO 22889^[53]和 ASTM E2472^[54],主要用于测试低约束条件下稳态裂纹扩展的断裂韧性,首次在标准中提出 CTOA 的测试方法,标准中对于多种 CTOA 测试方法的比较如表 1 所示.

表 1 CTOA 测试方法比较

种类	测试方法	测试说明
直接测试法(实验中)	光学显微镜(OM)	1. 只能测试试样表面的 CTOA
	数字图像相关法(DIC)	2. 测试范围指定在裂尖 0.5~1.5 mm
间接测试法(实验后)	显微形貌法 (microtopography)	1. 可以测量试样不同厚度位置的 CTOA 2. 利用断裂表面分离函数计算不同位置的裂纹扩展量
	有限元分析法	1. 对单元尺寸的依赖性 2. 裂纹长度和韧带区长度需大于 $a/B > 4$, $b/B > 4$
	δ_5 间接测量	1. 适用于中短距离裂纹扩展,长程裂纹扩展精度降低

由于通过实验准确测量 CTOA 仍较为困难,有限元分析可以作为一个有效的辅助手段.在实验方法中,利用 δ_5 间接测量 CTOA 的试验方法最为简便,但对于长程裂纹稳态扩展适用性受限.其实试验方法需要大量的实验后处理或昂贵的实验设备,实验测量成本相对较高.鉴于在 ISO 22889 和 ASTM E2472 标准中,仅提供 C(T) 和 M(T) 等标准试样,难以满足长程稳态裂纹的扩展要求,

Shterenlikht^[55]曾提出采用 MDCB 试样利用数字图像相关法测量管道钢的 CTOA 值.

4 基于应变的管道断裂评估

在管道发生大范围屈服时,应变能力对应力敏感,基于应变的方法似乎更为合理,在这种背景下,基于应变的管道断裂评估方法被提出.对基于应变的管道断裂评估方法的研究包括三部分:一

是管道基于应变的驱动力方程;二是管道失效准则;三是管道断裂韧性的测试,在基于应变的管道断裂评估方法中,推荐采用上节介绍的 SENT 试件测试管道的断裂韧性.

4.1 基于应变的驱动力方程

裂纹驱动力指的是能够驱动裂纹扩展、材料分离或断裂的一种力. 现行的大多数方法中,裂纹驱动力表示为一个外加总应力的函数,是以应力为基础的. Bratfos^[56] 和 Linkens 等^[57] 提出采用基于应变的断裂评估方法,然而这些评估方法仍然是基于现有的驱动力方程,它们仅仅局限于小塑性应变的情形,是否应用于产生大塑性变形的结构值得怀疑. 为了充分利用高强度管道钢在大变形条件下的变形能力,新的基于应变的断裂评估方法被提出,即建立基于应变的裂纹驱动力方程,其中裂纹驱动力 (CTOD) 是施加应变的函数,其基本原理如图 2 所示.

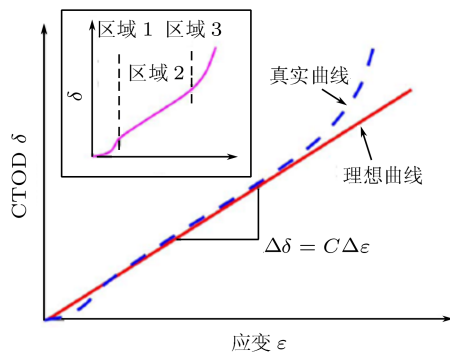


图 2 基于应变的裂纹驱动力方程的示意图

图 2 中分为 3 个不同的区域. 在区域 1 中管道的整体响应是弹性的, CTOD 值随着应变增加而缓慢增加,在裂纹韧带发展为完全塑性前 CTOD 快速增加. 在区域 2 开始阶段,管道整个阶段发展为塑性,可以看出施加应变和 CTOD 之间几乎是线性关系. 由于韧带颈缩的作用,曲线有轻微向上凹的趋势. 在区域 3, CTOD 随着裂纹韧带坍塌而急剧增加. 如果将区域 2 中施加应变和 CTOD 的线性关系应用在区域 1,在某种程度上高估了外加应变在区域 1 的作用,但是由于所关注的重点是区域 2 的塑性行为,因此可以忽略区域 1 的作用. 基于区域 2,可以得到基于应变的驱动力方程

$$\Delta\delta = C\Delta\varepsilon \quad (8)$$

式中, δ 为起始裂纹尖端张开位移 CTOD; ε 为管道远端轴向拉伸应变.

对于驱动力方程的研究,主要是基于上述原理获得 CTOD 与施加应变的关系,进而对缺陷进行评估. Jayadevan 等^[58] 和 Østby 等^[59] 分别研究在拉伸和弯曲条件下承受大变形管道的裂纹深度、裂纹长度、径厚比、材料的硬化指数和内压等参数对 CTOD 与应变关系的影响. Østby^[60] 在上述研究的基础上提出了基于应变的驱动力方程的基本形式如下

$$\delta = t \int_0^\varepsilon C(a/t)d\varepsilon = t \int_0^\varepsilon fg d\varepsilon \quad (9)$$

式中, t 为管道壁厚, a 为裂纹深度, c 为裂纹长度, f 函数表示相对裂纹深度 a/t 和相对裂纹长度 c/t 对裂纹驱动力的影响, g 函数表示管材的屈强比 $\delta_{0.2}/\delta_{TS}$ 对裂纹驱动力的影响.

式 (9) 的适用范围是: $20 < D/t < 40$, $0.82 < \delta_{0.2}/\delta_{TS} < 0.93$, $a/t < 0.35$, $2c < 300$ mm. 同时, Østby 提出了有效壁厚、有效韧带高度和有效裂纹深度的概念,将内压、屈服应力不匹配和错边对驱动力的影响,转换为相应的有效壁厚或有效裂纹深度,并将其代入式 (9) 以求得相应的驱动力方程. 随后进行了小尺寸和全尺寸实验来验证提出的简化的基于应变的驱动力方程: 当管道压力为 3.25×10^7 Pa (325 bar) 时提出的模型能够很好地预测裂纹扩展; 压力为 1.35×10^7 Pa (135 bar) 时实验测出的失效应变比预测值高 10%~20%^[31]. 但 Østby 提出的上述方程仍存在问题: ① 驱动力方程没有考虑径厚比的影响, ② 在材料模型中假设材料塑性部分的应力/应变遵循幂函数关系,而没有考虑 Luder 屈服平台对驱动力的影响; ③ 对于材料不匹配仅仅考虑了屈服应力不匹配的影响, ④ 上述研究将深埋缺陷归为表面缺陷, Olsø 等^[61] 研究发现当韧带的高度等于或稍微大于缺陷高度时,深埋缺陷更具危险性. 但 Olsø 仅仅研究一种材料和管道尺寸,在其他几何尺寸、材料应力应变曲线和阻力曲线组合的情况下是否也有相同的结论值得进一步的研究.

大量的实验和数值模拟研究^[59,62-63] 表明内压能显著影响裂纹扩展驱动力. Berg 等^[64] 和 Østby^[65] 进行了 4 点弯曲实验以研究双轴载荷对管道外表面缺陷驱动力的影响. 实验结果表明: 双轴载荷对裂纹扩展驱动力有重大影响,并导致失效模式的转变. 对于相同的缺陷,没有内压管道可能会因压缩一侧的局部屈曲而失效,但是在双轴载荷条件下,管道就可能因拉伸侧的断裂而失效,而应变能力由无内压管道的 3.5%~4% 减少到承受双轴

载荷管道的 1.5%~2%，而且发现双轴载荷的不利影响主要是由于内压的存在增加了裂纹驱动力。

Liu 等^[66]研究了热影响区 HAZ(heat affected zone) 的软化对裂纹驱动力的影响。一方面，热影响区软化可以增加 CTOD 驱动力，但增长幅度与热影响区宽度和软化的程度相关；另一方面，焊接过匹配降低了总的 CTOD 裂纹驱动力，同时研究发现由热影响区软化导致 CTOD 驱动力增加和应变集中并不依赖于缺陷尺寸。大部分裂纹尖端变形位于热影响区，热影响区软化导致非对称裂纹尖端发生变形，非对称变形区域随着热影响区的宽度和软化程度的增加而增加。

基于断裂力学理论、大量的实验以及经验总结并结合数值模拟结果，Wang 等^[41]提出了定量确定含表面缺陷和深埋缺陷管道拉伸应变能力的计算方程。表面缺陷拉伸应变极限方程如式 (10) 所示

$$\epsilon_{\text{limit}} = \delta^{(2.36-1.58\lambda-0.101\xi\eta)}(1 + 16.1\lambda^{-4.45}) \cdot (-0.0157 + 0.239\xi^{-0.241}\eta^{-0.315}) \quad (10)$$

式中， δ 为表观韧性 CTOD，单位为 mm； λ 是屈强比； ξ 是缺陷长度与壁厚之比，大小为 $2c/t$ ； η 是缺陷高度与壁厚之比； t 为管道壁厚，单位为 mm。

此拉伸应变计算方法被 CSA Z662-2007^[43] 采用作为在缺少详细信息时对管道应变能力的估算程序。此方程忽略了直径变化对应变能力的影响，同时没有考虑内压和热影响区软化对驱动力的影响，其计算结果仍然具有一定的保守性。

4.2 CTOD 失效准则

在基于应变驱动力方程的断裂评估中，管道失效准则也是非常重要的一环。Østby 等^[61]根据失效机理把含缺陷管道的失效分为由韧带塑性失稳引起的整体失效和裂纹不稳定扩展导致的局部失效，并分别提出了整体失效和局部失效的 CTOD 准则。整体失效的 CTOD 准则通过滑移带理论推导，其值与韧带的高度和材料应力应变曲线中抗拉强度所对应的应变成正比例关系；而局部失效的 CTOD 值取决于韧带的高度、材料屈强比和裂纹韧性撕裂起始时的 CTOD 值。Berg 等^[64]研究发现整体失效和局部失效依赖于结构的几何、材料和载荷条件。Berg 对整体失效准则和局部失效准则进行了对比，发现在应力-应变曲线中由于两者确定的临界失效点不同而导致给出结

果的不同，而且整体失效的裂纹扩展长度明显长于局部失效。

在错边和焊接不匹配等情况下，熔合线裂纹两边的 CTOD 值不同，如果采用裂纹两边的 CTOD 值之和来评定裂纹失效将会变得不准确。为此，Østby^[67]改进了对韧性撕裂的 CTOD 失效准则，对裂纹的两侧管体分别进行评估，当其中任一侧达到失效条件时，管道将会失效。在实际工程应用过程中，裂纹韧性撕裂起始时的 CTOD 值难以测量，针对这一情况，Østby 提出在确定局部失效准则时将裂纹韧性撕裂起始时的 CTOD 值用韧性撕裂 1 mm 处的 CTOD 值来代替。

Sandvik 等^[68-69]针对于承受大变形的表面裂纹管道，提出了概率断裂评估方法。该方法采用响应面建立概率断裂力学模型，并基于建立的模型采用一阶可靠性方法 (first order reliability method, FORM) 和二阶可靠性方法 (second order reliability method, SORM) 求解概率。研究发现与 SORM 方法相比，FORM 得出的结果更加保守和可靠。同时采用整体和局部失效准则计算并进行对比，结果表明采用局部失效准则的失效概率相对大，其计算结果相对保守。

然而，上述局部失效准则研究中均假设裂纹长度是管道壁厚的 5 倍，对于具有短裂纹的管道，其失效将会受到裂纹末端的影响，导致局部失效准则预测保守的结果；同时局部失效准则均是基于管道受到拉伸载荷的假设，是否可以适用于弯曲载荷的情况还需进一步研究；而且上述研究将表面缺陷代替深埋缺陷，没有研究深埋缺陷的影响；由于目前管道具有两种失效准则，如果采用两者的较小值难以确定是否能够得到准确的评估结果，因此，为方便实际工程应用应将两个准则结合成一个失效准则。

5 基于失效评估图 (FAD) 的断裂评估

失效评估图 (FAD) 方法在工程实际中有很大的实用价值，它提供了一种方便的失效评定方法，评价结构由脆断到塑性失稳的全部失效形式。但是由于目前的 FAD 评估方法均是基于应力，当位移或应变控制的载荷使管道处于大范围屈服条件下将导致不准确的评估结果，

解决这一问题的思路有两种：一是修正现有的基于应力评估方法，二是提出基于应变的 FAD 方法。

5.1 现有失效评估图的修正

针对于海底管道的大变形,一些评估方法均进行了更新,以满足海底管道对变形能力的要求,如 DNV OS F101^[32] 标准提出将塑性失稳的定义用抗拉强度代替流动应力,以提高可接受应变的大小,进而增加允许缺陷的大小.这个方法是基于 BS 7910 框架,因此仍然保持了基于应力和载荷控制的条件,仅仅适用于中等塑性应变的情况.

Wastberg 等^[70]和 DNV-RP-F108^[28]两者推荐采用针对于具体材料韧性撕裂评估的 BS 7910 水平 3B 进行断裂评估,并采用 Kastner 方程求解参考应力.经过实验验证,推荐失效评定曲线的截止线 L_r^{\max} 定义为抗拉强度和屈服强度之比,并推荐采用宽板实验以验证评估结果. Nyhus^[11]研究表明由 SENT 试件测得的临界净截面应力高于流动应力. SENT 小试件和全尺寸试验比较,验证了在断裂评估中采用 SENT 试件的净截面应力作为塑性失稳准则是保守的,但是与标准的评估方法相比,其保守性已经被大大降低.

Ainsworth 和 O'Dowd 等^[71-72]提出基于约束修正的 FAD 方法,以反映不同裂纹几何尺寸、载荷方式和结构的约束对失效评估图的影响. Cravero 等^[73]结合结构的约束对失效评估图的潜在作用,采用 J - Q 理论推导出基于约束修正的 FAD 失效曲线,并应用于管道的完整性评估.然而,修正的 FAD 曲线显示了高的几何依赖性.

5.2 基于应变的失效评估图

(1) 基于应变的 J 积分

Linkens 等^[57]在 J 积分估算中提出了参考应变方法 (reference strain method, RSM) 的概念,其表达形式如下

$$J = F^2 \pi a \sigma_{\text{nom}} \varepsilon_{\text{nom}} \left(\frac{\varepsilon_{\text{ref}} / \sigma_{\text{ref}}}{\varepsilon_{\text{nom}} / \sigma_{\text{nom}}} \right) \quad (11)$$

式中, σ_{nom} 和 ε_{nom} 分别为施加的名义应力和应变, σ_{ref} 和 ε_{ref} 分别为参考应力和参考应变, F 为应力强度因子的几何修正因子.

对于浅裂纹, Linkens 在式 (11) 中采用 $\bar{\sigma}_{\text{uc}}$ 和 $\bar{\varepsilon}_{\text{uc}}$ 替换 σ_{nom} 和 ε_{nom} , 且在方程的前面乘以系数 2 以补偿简化近似

$$J = 2F^2 \pi a \bar{\sigma}_{\text{uc}} \bar{\varepsilon}_{\text{uc}} \quad (12)$$

式中, $\bar{\sigma}_{\text{uc}}$ 和 $\bar{\varepsilon}_{\text{uc}}$ 分别为在裂纹位置处弹塑性无裂纹体的等效应力和等效应变.

随后 Linkens 提出一个更为精确的近似表达式

$$J = F^2 \pi a \left(\bar{\sigma}_{\text{uc}} \bar{\varepsilon}_{\text{uc}} + \frac{\bar{\sigma}_{\text{uc}}^5}{2E \bar{\varepsilon}_{\text{uc}} \sigma_y^2} \right) \quad (13)$$

式中, E 为弹性模量, 式 (13) 与 R6 中选项 2 的小范围屈服的 J 积分估算形式相一致, 其主要是针对小裂纹的拉伸情况, 其中 $\sigma_{\text{ref}} \cong \bar{\sigma}_{\text{uc}}$.

然而, 有限元计算结果表明: 对于受拉伸载荷的含表面半椭圆裂纹宽板, Linkens 的简化方程过高地估计了 J 积分, 而随着裂纹变深, 保守程度降低; 在弯曲载荷的情况下, Linkens 的简化方程估计 J 积分要比在拉伸载荷情况下保守得多.

Schwalbe 等^[74]提出了在平面应力条件下基于应变的 J 积分估计式, 其推导是基于长度为 $2a$ 的对称裂纹、宽度为 $2W$ 承受拉伸载荷的宽板, 特别是中心裂纹或双边缺口宽板. 式 (14) 和 (15) 分别是有限和无限宽度宽板的 J 积分估计.

$$J = 0.81 \delta_Y^{1-n} (1 - a/W)^2 E^n \pi a F_{\text{eff}}^2 \cdot [1 + 1.045(1 - a/W)^2 F^2] \varepsilon_a^{1+n} \quad (14)$$

和

$$J = 1.14 \pi a \sigma_Y (E/\sigma_Y)^n \varepsilon_a^{1+n} \quad (15)$$

式中, n 为管材硬化指数, σ_Y 为比例极限强度, 单位为 MPa; w 为板宽, 单位为 mm; F_{eff} 为应力强度因子的等效修正因子; ε_a 为施加应变.

(2) 基于应变的失效评估图

基于 R6 的断裂评估方法, Budden^[75]首次提出了基于应变的失效评估图 (strain-based failure assessment diagram, SB-FAD), 其形式与基于应力的 FAD 相似, 如图 3 所示. 定义 SB-FAD 的双轴为 D_r 和 K_r , 横坐标 D_r 被表示为参考应变与屈服应变的比值, $D_r = \varepsilon_{\text{ref}} / \varepsilon_y = L_r (E \varepsilon_{\text{ref}} / \sigma_{\text{ref}})$; 纵坐标与 R6 中的定义相同, $K_r = K / K_{\text{mat}}$. 截止线定义为流动应变与屈服应变的比值, 其中参考应变为流动应力在材料真应力/应变曲线上对应的应变.

Budden 提出的基于应变断裂评估曲线是针对浅裂纹 ($a/w = 0.2$), 在计算 J 积分时进行了简化, 假设参考应变和参考应力等于非裂纹体的名义应变和名义应力. 在将此评估方法应用于工程评估之前, SB-FAD 方法有待于进一步研究, 特别是如何定义深裂纹参考应变和失效评估曲线, 同时需要更多的有限元计算验证. 另外, 对于一般工程评估, 需要进一步研究 SB-FAD 方法在具有明显强度不匹配的焊接结构中的应用.

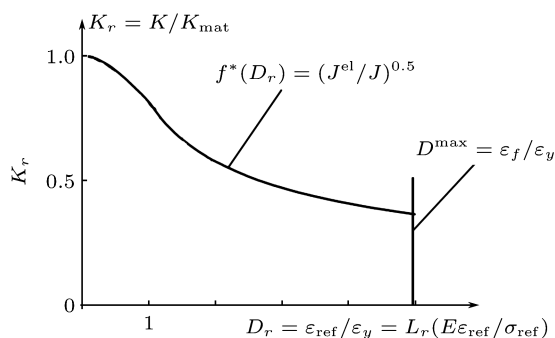


图 3 基于应变的失效评估图

6 结 语

油气管道建设与安全运营已经对管道大范围屈服断裂评估提出了迫切需求, 相关的研究在基于应变的断裂评估方法、失效判据以及基于约束校正的断裂韧性测试方面已经取得重要进展, 但还不很完善, 未来有可能或需要进一步研究的内容有:

(1) 由于油气管道的薄壁特点, 其裂纹尖端往往是低约束状态, 因此, SENT 试件在管道断裂韧性测试方面非常有潜力, 因为其裂纹尖端的约束度和管道裂纹相近, 但现有的 SENT 断裂韧性测试程序也存在一定的局限性, 一些问题有待进一步地研究, 例如, 裂纹前沿的平直度对断裂韧性的影响、CTOD 或 J 积分表达的裂纹扩展曲线的有效范围、如何测试熔合线裂纹的断裂韧性等等. 此外, 应基于约束参数建立各种试件 (SENT, SENB 或 CT 等) 与管道断裂韧性的转换关系.

(2) 现有的基于应变的驱动力方程没有考虑裂纹的稳定断裂过程, 导致计算结果趋于保守, 应采用韧性撕裂模型进行计算以建立更为准确的驱动力方程; 并且在基于应变的驱动力方程的研究中广泛采用有限元模型, 但是全尺寸实验却很少, 因此, 需要更多的全尺寸实验以验证和支持数值模拟结果.

(3) 焊缝及其热影响区 (HAZ) 的裂纹扩展是非平面的, 这主要是归因于焊缝金属的强度高于母材. 然而目前的驱动力方程均是基于 I 型裂纹扩展, 对于非平面裂纹扩展, 基于应变的断裂评估是否可靠需要进一步研究.

(4) 含缺陷管道的应变能力具有很大的分散性, 影响参数很多, 如缺陷大小、焊接不匹配和裂纹扩展阻力曲线等. 如何考虑影响参数的分散性对定义合适的安全系数的影响给基于应变断裂评

估带来严峻挑战, 特别是如何处理焊接件的非均匀材料性能导致的焊接不匹配引起的分散性影响.

(5) 基于应变断裂评估中局部失效准则是基于管道受到拉伸载荷和表面缺陷的情况, 能否适用于弯曲载荷的情况还需进一步研究, 同时, 应该研究深埋缺陷的驱动力及其失效准则.

(6) 在基于应变的失效评估图中, 现有的评估曲线是基于浅裂纹 ($a/w = 0.2$), 应进一步研究如何定义深裂纹参考应变并确定深裂纹的失效评估曲线.

参 考 文 献

- 1 Ainsworth R. R6-Revision 4: 2001 Assessment of the Integrity of Structure Containing Defect. London: British Energy Generation Ltd, Amendment, 2001
- 2 British Standards Institution. BS 7910-2005 Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures. London: the authority of the Standards Policy and Strategy Committee, 2005
- 3 Nyhus B, Østby E, Thaulow C, et al. SENT testing and the effect of geometry constraint in high strength steel. In: Proceedings of International Symposium High Strength Steel, Verdal, Norway, 2002
- 4 Shih C F, German M D. Requirements for a one parameter characterization of crack tip fields by the HRR singularity. *International Journal of Fracture*, 1981, 17(1): 27-43
- 5 Pavankumar T V, Chattopadhyay J, Dutta B K, et al. Transferability of specimen JR- Δa curve to straight pipes with throughwall circumferential flaws. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2002, 79(2): 127-134
- 6 Betegon C, Hancock J W. Two-parameter characterisation of elastic-plastic crack-tip fields. *Journal of Applied Mechanics*, 1991, 58: 23-43.
- 7 Wang Y Y, Parks D M. Evaluation of the elastic t-stress in surface-cracked plates using the line-spring method. *International Journal of Fracture*, 1992, 56: 25-40
- 8 O'Dowd N P, Shih C F. Family of crack-tip fields characterised by a triaxiality parameter: Part I — structure of fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1991, 39: 989-1015
- 9 O'Dowd N P, Shih C F. Family of crack-tip fields characterised by a triaxiality parameter: Part II — fracture Applications. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1992, 40: 939-963
- 10 O'Dowd N P, Shih C F. Two-parameter fracture mechanics: theory and applications. *Fracture Mechanics*, ASTM STP 1207, 1994: 21-47
- 11 Nyhus B, Loria M P, Ørjasæter O L. SENT specimens an alternative to SENB specimens for fracture mechanics testing of pipelines. In: Proceedings of 22ND International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Cancun, June 8-13, 2003. New York: ASME, 2003.259-266
- 12 Thaulow C, Østby E, Nyhus B, et al. Constraint correction of high strength steel Selection of test specimens and application of direct calculations. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, 71: 2417-2433
- 13 Xu J, Zhang Z L, Østby E, et al. Effects of crack depth and specimen size on ductile crack growth of SENT and SENB specimens for fracture mechanics evaluation of pipeline steels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2009, 86(12): 787-797

- 14 Yang S, Chao Y J, Sutton M A. Complete theoretical analysis for higher order asymptotic terms and the HRR zone at a crack tip for mode I and mode II loading of a hardening material. *Acta Mechanica*, 1993, 98: 79-98
- 15 Yang S, Chao Y J, Sutton M A. Higher order asymptotic fields in a power law hardening material. *Engineering Fracture Mechanics*, 1993, 45:1-20
- 16 Chao Y J, Yang S, Sutton M A. On the fracture of solids characterized by one or two parameters: theory and practice. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1994, 42:629-647
- 17 王钟羨. 缺口应力预测和裂纹尖端约束评估:[博士论文]. 南京: 南京理工大学, 2008. 102-108
- 18 McClintok F A. A criterion for ductile fracture by the growth of holes. *Journal of Applied Mechanics*, 1968, 35:363-371
- 19 Rice J R, Tracey D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1969, 17: 201-217
- 20 Pick R J, Glover A G, Coote R I. Full scale testing of large diameter pipelines. In: Proceedings of Conference on Pipeline and Energy Plant Piping. New York: Pergamon Press, 1980. 357-366
- 21 Glover A G, Coote R I. Full-scale fracture tests of pipeline girth welds in circumferential cracks. In: Wilkowski G M, Ed. *Pressure Vessels and Piping-Vol. II, PVP Vol. 95*, 1984. 107-121
- 22 Denys R M. Wide plate testing of weldments, Part I, II, and III. In: H. McHenry and Potter J Ed. *Fatigue and fracture testing of weldments ASTM STP 1058*, ASTM, Philadelphia, 1990.157-228
- 23 Denys R, Waelle W, Lefevre A, et al. Plastic straining capacity of axially-loaded pipelines: experimental facts and critical considerations. In: Proceedings of the 4th International Conference on Pipeline Technology, May 09-13, 2004, Ostend, Belgium, 2004.183-207
- 24 Chiesa M, Nyhus B, Skallerud B, et al. Efficient fracture assessment of pipelines. A constraint-corrected SENT specimen approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(5): 527-547
- 25 Cravero S, Ruggieri C. Correlation of fracture behavior in high pressure pipelines with axial flaws using constraint designed test specimens-Part I: Plane-strain analyses. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, 72(9): 1344-1360
- 26 Wästberg S, Pisarski H, Nyhus B. Guidelines for engineering critical assessments for pipeline installation methods introducing cyclic plastic strain. In: Proceedings of 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada, June 20-25, 2004. New York: ASME, 2004.1-8
- 27 Nyhus B, Østby E, Knagenhjelm H O, et al. Experimental studies on the effect of crack depth and asymmetric geometries on the ductile tearing resistance. In: Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, June 12-17, 2005. New York: ASME, 2004.1-10
- 28 Det Norske Veritas (DNV). DNV-RP-F108 Fracture Control for Pipeline Installation Methods Introducing Cyclic Plastic Strain. HØvik, Norway: Det Norske Veritas, 2006
- 29 Xu J, Zhang Z L, Østby E, et al. Constraint effect on the ductile crack growth resistance of circumferentially cracked pipes. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, 77: 671-684
- 30 Garwood S J, Davey T G, Creswell S L. Behaviour of A533B under biaxial loading at +70C. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1989, 36:199-224
- 31 Øtby E, Hellesvik A O. Large-scale experimental investigation of the effect of biaxial loading on the deformation capacity of pipes with defects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85:814-824
- 32 Det Norske Veritas (DNV). DNV-OS F101-2007 Submarine Pipeline Systems. HØvik Norway: Det Norske Veritas, 2007
- 33 Shen G W, Gianetto J A, Tyson W R. Measurement of J-R curves using single-specimen technique on clamped SE(T) specimens. In: Proceedings of the Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, June 21-26, 2009. Cupertino:ISOPE, 2009.92-99
- 34 Cravero S, Ruggieri C. Estimation procedure of J-resistance curves for SE(T) fracture specimens using unloading compliance. *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, 74(17): 2735-2757
- 35 Østby E, Hauge M, Levold E, et al. Strain capacity of SENT specimens-Influence of weld metal mismatch and ductile tearing resistance. In: Proceedings of the Eighteenth (2008) International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, July 6-11, 2008. Cupertino:ISOPE,2008.64-71
- 36 Tang H, Minnaar K, Kibey S, et al. Development of the SENT test for strain-based design of welded pipelines. In: Proceedings of the 8th International Pipeline Conference, Calgary, September 27-October 1, 2010. New York: ASME, 2010.303-312
- 37 Østby E, Thaulow C, Zhang Z L. Numerical simulations of specimen size and mismatch effects in ductile crack growth - Part I: tearing resistance and crack growth paths. *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, 74: 1770-1792
- 38 Nourpanah N, Taheri F. Ductile crack growth and constraint in pipelines subject to combined loadings. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78: 2010-2028
- 39 Wang Y Y, Cheng W, McLamb M, et al. Tensile strain limits of girth welds with surface-breaking defects: Part I-an analytical framework. In: Proceedings of the 4th International Conference on Pipeline Technology, Ostend, Belgium, May 9-13, 2004
- 40 Wang Y Y, Horsley D, Cheng W, et al. Tensile strain limits of girth welds with surface-breaking defects: Part II-experimental correlation and validation. In: Proceedings of the 4th International Conference on Pipeline Technology, Ostend, Belgium, May 9-13, 2004
- 41 Wang Y Y, Liu M, Horsley D, et al. A quantitative approach to tensile strain capacity of pipelines. In: Proceedings of the 6th International Pipeline Conference, Calgary, September 25- 29, 2006. New York: ASME, 2010.545-552
- 42 Wang Y Y, Liu M and Horsley D. Apparent fracture toughness from constraint considerations and direct testing. In: Proceedings of the Sixteenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal, July 1-6, 2007. Cupertino: ISOPE, 2007.3179-3185
- 43 Canadian Standards Association. CSA Z662-2007 Oil and Gas Pipeline Systems. Rexdale, Ontario, Canada: Canadian Standards Association, 2007
- 44 Wang Y Y, Rudland D, Liu M. Experimental validation of constraint effects, GRI report GRI-04/0147R. February, 2005
- 45 The Japan Welding Engineering Society. Method for assessment of brittle fracture in steel weldments subjected to cyclic and dynamic large straining. Japan Welding Engineering Society technical report, WES TR 2008, 2002
- 46 Hancock J W. Constraint and toughness parameterized by T in constraint effects in fracture. In: ASTM-Symposium on Constraint Effects in Fracture, ASTM STP 1171, March, 1993
- 47 Brocks W. Quantitative assessment of the role of crack tip constraint on ductile tearing in constraint effects in fracture. In: ASTM-Symposium on Constraint Effects in Fracture, ASTM STP 1171, March, 1993

- 48 Liu M, Wang Y Y, Long X. Enhanced apparent toughness approach to tensile strain design. In: Proceedings of the 8th International Pipeline Conference, Calgary, September 27-October 1, 2010. New York: ASME, 2010.187-194
- 49 Andersson H. A finite element representation of stable crack growth. *J Mech Phys Solids*, 1973, 21:337-356
- 50 De Koning A U. A contribution to the analysis of quasi static crack growth in steel materials. In: Proceedings of the fourth international conference fracture (ICF4), 1977, 3: 25-31
- 51 Mahmoud S, Lease, K. The effect of specimen thickness on the experimental characterization of critical crack-tip-opening angle in 2024-T351 aluminum alloy. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70:443-456
- 52 Wang J Q, Shuai J, Xu X R. Study of Influence Factors on the CTOA Toughness Values by Experiment/Simulation Method. In: Proceedings of 8th International Pipeline Conference, Calgary, September 27-October 1, 2010. New York: ASME, 2010.329-340
- 53 ISO 22889:2007 (E). Metallic materials - method of test for the determination of resistance to stable crack extension using specimens of low constraint. International Organization for Standardization, 2007
- 54 ASTM E2472-06. Standard test method for determination of resistance to stable crack extension under low-constraint conditions. ASTM International, 2006
- 55 Shterenlikht A, Hashemi S H, Howard I C, et al. A specimen for studying the resistance to ductile crack propagation in pipes. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, 71:1997-2013
- 56 Bratfos H A. Use of strain-based ECA for the assessment of flaws in pipeline girth welds subjected to plastic deformations. In: Proceedings of International conference on application and evaluation of high grade linepipes in hostile environments, Yokohama, November 7-8, 2002.957-985
- 57 Linkens D, Formby C L, Ainsworth R A. A strain-based approach to fracture assessment-example applications. In: Proceedings of fifth International Conference on engineering structural integrity assessment, EMAS, 2000.
- 58 Jayadevana K R, Østby E, Thaulow C. Fracture response of pipelines subjected to large plastic deformation under tension. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004, 81: 771-783
- 59 Østby E, Jayadevana K R, Thaulow C. Fracture response of pipelines subject to large plastic deformation under bending. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2005, 82:201-215
- 60 Østby E. New strain-based fracture mechanics equations including the effects of biaxial loading, mismatch and misalignment. In: Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, June 12-17, 2005. New York: ASME, 2010.649-658
- 61 Olsø E, Berg E, Holthe K, et al. Effect of embedded defects in pipelines subjected to plastic strains during operation. In: Proceedings of the Eighteenth (2008) International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, July 6-11, 2008. Cupertino: ISOPE, 2008.143-148
- 62 Østby E, Thaulow C, Nyhus B. A new approach to ductile tearing assessment of pipelines under large-scale yielding. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2007, 84: 337-348
- 63 Shimanuki H, Inoue T. Assessment of brittle fracture in girth weld joint of pipelines subjected to internal pressure and bending load. In: Proceeding of International Conference on the application and evaluation high grade linepipes in hostile environments, Yokohama, Japan, 2002
- 64 Berg E, Østby E, Thaulow C, et al. Ultimate fracture capacity of pressurized pipes with defects-Comparisons of large scale testing and numerical simulations. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75: 2352-2366
- 65 Østby E. Fracture control - offshore pipelines JIP results from large scale testing of the effect of biaxial loading on the strain capacity of pipes with defects. In: Proceedings of the Sixteenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference Lisbon, Portugal, July 1-6, 2007. Cupertino: ISOPE, 2007.3231-3237
- 66 Liu M, Wang Y Y, Horsley D. Significance of HAZ softening on strain concentration and crack driving force in pipeline girth welds. In: Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, June 12-17, 2005. New York: ASME, 2010.385-393
- 67 Østby E. Fracture Control-Offshore Pipelines JIP Proposal for strain-based fracture assessment procedure. In: Proceedings of the Sixteenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference Lisbon, July 1-6, 2007. Cupertino: ISOPE, 2007.3238-3245
- 68 Sandvik A, Østby E, Thaulow C. Probabilistic fracture assessment of surface cracked pipes using strain-based approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 2006, 73.1491-1509
- 69 Sandvik A, Østby E, Thaulow C. A probabilistic fracture mechanics model including 3D ductile tearing of bi-axially loaded pipes with surface cracks. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75: 76-96
- 70 Wästberg S, Pisarski H, Nyhus B. Guidelines for engineering critical assessments for pipeline installation methods introducing cyclic plastic strain. In: Proceedings of, 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, June 20-25, 2004. New York: ASME, 2004.19-26
- 71 Ainsworth R A, O'Dowd N P. Constraint in the failure assessment diagram approach for fracture assessment. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1995, 117:260-267
- 72 Ainsworth R A. A constraint-based failure assessment diagram for fracture assessment. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1995, 64:277-285
- 73 Cravero S, Ruggieri C. Structural integrity analysis of axially cracked pipelines using conventional and constraint-modified failure assessment diagrams. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2006, 83: 607-617
- 74 Schwalbe K H. The crack tip opening displacement and J integral under strain control and fully plastic conditions estimated by the engineering treatment model for plane stress tension. In: ASTM STP, 1207, Philadelphia, 1994.636-651
- 75 Budden P J. Failure assessment diagram methods for strain-based fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 2006, 73: 537-552

RESEARCH STATUS AND PROGRESS IN FRACTURE ASSESSMENT OF PIPELINE UNDER THE CONDITION OF LARGE-SCALE YIELDING*

HAN Kejiang¹ SHUAI Jian^{1,†} WANG Junqiang¹ HUO Chunyong²

¹ College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

² CNPC Tubular Goods Research Institute, Xian 710065, China

Abstract With the application of high-strength and high-toughness pipeline steel, relevant fracture assessment is needed for pipeline under large-scale yielding condition. This article summarizes limitations that govern the conventional fracture mechanics when applied to the fracture assessment of pipeline under the condition of large-scale yielding. Here, progresses in pipeline fracture assessment under the condition of large-scale yielding are presented in detailed in four main aspects: two-parameter fracture mechanics, constraint-corrected fracture toughness test, strain-based fracture assessment, and strain-based failure assessment diagram. First of all, two methods for constraint-corrected fracture toughness test are discussed, which is SENT specimen and apparent fracture toughness method. The research status and existing problem are reviewed for constraint-corrected fracture toughness test based on SENT specimen. The basic principles of strain-based fracture assessment are presented. The strain-based driving force equation and the CTOD failure criteria are introduced in the method of strain-based fracture assessment. Finally, an overview is given for the strain-based J-integral estimation and strain-based failure assessment diagram. Finally, key topics for further studies are pointed out.

Keywords large scale yielding, pipeline, fracture assessment, strain-based, failure criteria



帅健, 中国石油大学(北京)教授, 博士生导师, 工程力学学科带头人. 主要研究方向管道与储罐强度、油气装备工程分析, 已出版专著《管线力学》, 主编教材《管道与储罐强度设计》, 6项成果获省部级科技进步奖, 在长输油气管道和大型原油储罐的安全评价、失效分析和完整性管理等方面取得了较好的理论创新和应用效果, 研究成果处于国际先进或国内领先水平. 目前发表论文120余篇, 其中EI、SCI检索40多篇. 现任国家质检总局特种设备安全技术委员会委员, 中国力学学会MTS材料试验专业委员会委员, 中国腐蚀与防护学会氢脆与应力腐蚀专业委员会委员.

* The project supported by Higher School Special Research Fund for the Doctoral Program (20100007110006).

† E-mail: Shuaij@cup.edu.cn