

文章编号:1009-6094(2020)03-0878-06

补强管道复合材料的 渐进失效分析*

王言聿¹,李 灿²,成志强¹

(1 西南交通大学力学与工程学院,应用力学与结构

安全四川省重点实验室,成都 610031;

2 中国石油西气东输管道公司,南京 210002)

摘要:复合材料缠绕补强是一种有效的管道缺陷修复技术,复合材料渐进失效对承载能力的影响有待研究。管道缺陷的局部效应和剩余强度,导致其渐进失效历程与复合材料压力容器(Composite Overwrapped Pressure Vessels, COPV)截然不同。采用复合材料补强的缺陷管件进行极限承载试验。通过对比试验极限压力与有限元模拟的渐进失效的破坏压力,验证有限元模型的正确性。有限元模拟结果表明,复合材料缠绕层发生以纤维破坏为特征的破坏模式。复合材料的渐进失效分为稳定缓慢失效和急剧加速失效两个阶段。对比 COPV 的瞬间大面积失效特征,分析了缓慢失效和急剧加速失效现象产生的原因,提出了实用的补强管道“临界压力”确定方法,为复合材料补强管道的设计提供参考。

关键词:安全工程;管道;复合材料补强;渐进破坏;极限承载试验;临界压力

中图分类号:X45 文献标志码:A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.0447

0 引言

油气输运管道在使用中不可避免地会产生各种缺陷,需要进行补强修复。作为补强技术之一,复合材料缠绕相对于其他补强技术有适用性广、成本低廉的优势,因而得到了广泛应用^[1]。目前,工业界已形成了多种工艺规范,如国际上最为通用的 ASME PCC-2^[2]等。国内也有通行的规范 Q/SY GD0192—2009。针对复合材料缠绕这一课题,学术界有大量研究。2001年, Toutanji 等^[3]首先针对均匀减薄的内腐蚀缺陷进行了解析分析。Freire 等^[4]在水压试验的基础上,提出了针对体积型缺陷的补强解析模型。在国内,2013年,帅健等^[5]最先进行了复合材料修复管道的解析分析,其结果与 Toutanji 等^[3]的类似,但未限定所针对的缺陷类型。缠绕补

强情况下,管道缺陷区域的变形协调、内力平衡和材料本构三者呈现复杂变化,数值分析的方法研究和结果分析成为必要手段。Freire^[4]、帅健^[5]和 Duell^[6]等报道了有限元(FEM)模拟与分析,复合材料均采用正交各向异性线弹性本构,未对复合材料的力学性能和失效模式做深入考虑。

复合材料失效是一个损伤演化过程,期间伴随着刚度退化和渐进破坏^[7]。对于复合材料缠绕压力容器(Composite Overwrapped Pressure Vessels, COPV),材料渐进失效的有限元模拟已见文献^[8-11]报道。但复合材料缠绕补强的损伤管道与复合材料缠绕压力容器的差别是非常显著的。首先,复合材料缠绕的压力容器具有完整的回转体结构,而被缠绕层补强的缺陷,使整体修复结构不对称,且具有严重的局部效应。其次,压力容器的金属内衬承载能力较弱,基本不具备承载功能。而管道的承载体就是金属管壁,管道缺陷通常仍具有一定的剩余强度,补强的目的则是恢复局部缺陷部位的承载能力。两者结构上的差异将会导致不同的渐进失效历程和特征。

本文对含体积型缺陷管件进行复合材料缠绕补强,并实施极限承载试验(水压破坏试验)。模拟分析复合材料渐进失效对管道承载能力的影响,并根据缠绕层外表面环向应变演化,提出补强管道临界压力确定方法。

1 极限承载试验及结果

极限承载试验管件见图1。试验管件采用 L245N 钢制造,管件规格为直径 219 mm × 11.8 mm,总长约 2.2 m。管件两端焊接了半球形管帽以实现封闭加压。管壁外表面采用机加工制作体积型缺陷。该缺陷位于管件中部,长度为 91 mm,宽度为 4 mm,剩余壁厚为 3.3 mm,缺陷深度基本均匀。在管件缺陷段长约 300 mm 范围内,实施复合材料缠绕层的补强修复。缺陷部位用改性环氧树脂填料填充至恢复管件外壁形状后,交替缠绕 S 级高强度单向玻璃纤维布并涂抹环氧树脂,制备复合材料缠绕层。共用 5 层纤维布和环氧树脂制成厚度为 3.5 mm 的缠绕修复。补强后的管件见图 2。将管件水平放置在支座上,以 $4.0 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量注入 20 °C 的水逐渐施加内压,直到管件破坏,记录涨破压力作为管件的承载极限。试验显示,经补强的管件,其极限承载能力为 43.5 MPa。管件涨破(爆管)发生在缺陷区域,破坏后的管件及缠绕层见图 3。试验显示,缠

* 收稿日期:2019-04-12

作者简介:王言聿,博士研究生,从事结构安全评估研究;成志强(通信作者),教授,博士,从事结构安全评估与修复研究,chengzhiqiang010@163.com。

绕层没有发生整体破坏,仅爆管位置上方的部分纤维发生断裂。这与文献[6]的试验现象不同,而与文献[4]观察到的现象接近。文献[6]制作缠绕层时,使用了含双向(经纬)纤维的碳纤维织物,而文献[4]管件使用的是与本文类似的单向玻璃纤维复合材料。与文献[4]试验现象类似,从一个侧面证实了本文试验的正确性。

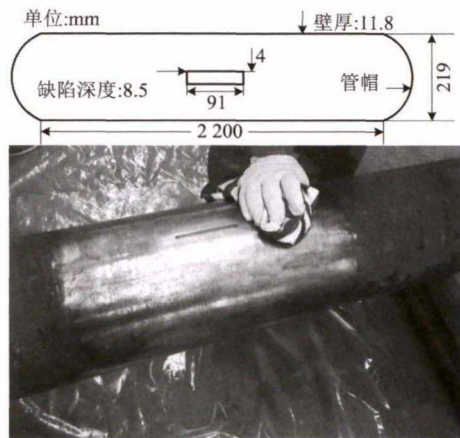


图1 管件及制作的缺陷
Fig.1 Test pipe and prepared defect



图2 水压试验管件
Fig.2 Test specimen subjected to inner pressure



图3 涨破后的缠绕层
Fig.3 Composite layer after burst of the repaired pipe

管件材料的力学性能见表1。L245N 钢的性能参数来自文献[12],而填料性能经过实际测试。表中 E 表示弹性模量, ν 表示泊松比, σ_y 表示屈服强度。管线钢和填料均近似服从 von Mises 屈服准则。文献[12]指出,屈服之后, L245N 钢的应力-应变关系可拟合为表1中的塑性阶段的指数型公式,式中 σ 为真应力(MPa), ϵ 为真应变。而性能测试表明,受压条件下填料具有近似的理想弹塑性本构。

复合材料的本构关系具有正交各向异性特征。表1中的弹性常数是根据不同向的材料力学性能测试和纤维布制造企业提供的数据按复合材料的混合准则^[13]确定的。其中, E 、 ν 和 G 分别代表弹性模量、泊松比和剪切模量,下标 x 、 y 、 z 分别表示管道的轴向、环向和径向,其中 y 也即纤维方向。复合材料的失效参数将在下文详述。以上材料性能数据也将用于下文的有限元模拟。

2 缠绕层渐进失效的有限元模拟

考虑结构几何和载荷的对称性,分别建立补强前后管件的 1/4 模型。采用 10 节点四面体单元和 8 节点六面体单元划分网格。有限元网格如图4所示,图中缺陷区域管壁的网格细节未显示填料和缠绕层。在对称面施加对称约束,管壁内表面施加试验压力 p 。实际管件承受内压后,管帽将产生轴向

表1 材料力学性能
Table 1 Mechanical performance of materials

材料	力学性能		
管线钢	弹性阶段	$E = 210 \text{ GPa}$	$\nu = 0.3$
	塑性阶段	$\sigma_y = 486 \text{ MPa}$	$\sigma = 865.57\epsilon^{0.29}$
填料	弹性阶段	$E = 2.3 \text{ GPa}$	$\nu = 0.4$
	塑性阶段	$\sigma_y = 99.7 \text{ MPa}$	
复合材料	弹性常数	$E_x = 3.43 \text{ GPa}$	$E_y = 23.10 \text{ GPa}$ $E_z = 3.43 \text{ GPa}$
		$\nu_{xy} = 0.31$	$\nu_{yz} = 0.31$ $\nu_{xz} = 0.1$
		$G_{xy} = 1.04 \text{ GPa}$	$G_{yz} = 1.04 \text{ GPa}$ $G_{xz} = 1.04 \text{ GPa}$
	失效参数	$X_t = 16.0 \text{ MPa}$	$X_c = 16.0 \text{ MPa}$ $Y_t = 645.0 \text{ MPa}$
	$Y_c = 464.5 \text{ MPa}$	$Z_t = 53.0 \text{ MPa}$ $Z_c = 53.0 \text{ MPa}$	
	$S_{xy} = 117.0 \text{ GPa}$	$S_{xz} = 117.0 \text{ GPa}$	

拉力。有限元模型不包括管帽,内压作用于管帽的作用通过模型端面的均布拉力代替。拉力值可以根据内压 p 计算。由于试验管件不长,管件内水的重量导致的弯矩较小,因此模拟中忽略了重力的作用。

L245N 钢和填料的弹、塑性力学性能及复合材料各向异性的材料常数见表 1。本文基于 Hashin 准则^[14]判断复合材料的失效,结合材料测试结果和 Wang 等^[11]报道的测试结果,确定了表 1 中的失效参数。其中, X 、 Y 、 Z 分别表示管件轴向、环向和径向,也即图 4 材料坐标中 x 、 y 、 z 方向的拉压强度;下标 t 表示受拉, c 表示受压; S_{xy} 和 S_{xz} 分别表示 xy 和 xz 平面内的剪切强度。失效参数的不同组合分别对

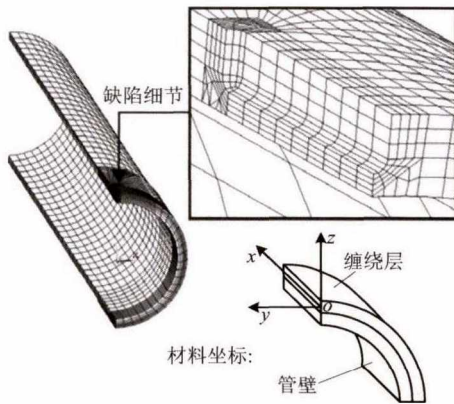


图 4 有限元模型网格及局部细节

Fig. 4 Mesh of finite element model and some local details

应复合材料的 6 种失效模式,见表 2。表中 σ 为正应力, τ 为剪应力,脚标表示方向。

加载过程中,复合材料渐进失效分析流程见图 5。根据表 1 中的失效参数及 Hashin 准则判据(见表 2),模拟确定复合材料的失效模式。针对不同失效模式,按表 2 所示方案进行失效材料的刚度退化。表 2 中 Q 表示材料的一组初始参数, Q_d 表示这组参数损伤后的数值。

模拟中,以管线钢发生塑性垮塌判断管件发生破坏(爆管)。模拟结果显示,修复管件在内压 46.75 MPa 左右发生破坏,与测试值 43.5 MPa 相比,误差约 7.5%。另一方面,按 ASME PCC-2^[2]规范预测涨破压力为 31.2 MPa。现行工艺规范的计算偏于安全,在工程实践中是合理的^[15]。

3 缠绕层渐进失效过程分析

管道缺陷的局部效应和剩余强度,导致其渐进失效历程与复合材料压力容器(Composite Overwrapped Pressure Vessels, COPV)截然不同。COPV 由复合材料缠绕层和铝等金属薄内衬组成,同时承受环向和轴向载荷,载荷主要由复合材料缠绕层承担。Knops^[13]和 Hashin^[14]等指出,对于 COPV,轴向荷载是造成基体破坏的主要因素。另外, Liu 等^[8]针对铝制内衬的复合材料压力容器的渐进失效有限

表 2 失效准则和刚度退化方案

Table 2 Failure criteria and rigidity deteriorating scheme

失效准则	失效模式	刚度退化
$\left(\frac{\sigma_z}{Z_t}\right)^2 \geq 1$	分层 ($\sigma_z > 0$)	$Q_d = 0.2Q$ ($Q = E_z, G_{xz}, G_{yz}, v_{xz}, v_{yz}$)
$\left(\frac{\sigma_z}{Z_c}\right)^2 \geq 1$	分层 ($\sigma_z < 0$)	$Q_d = 0.2Q$ ($Q = E_z, G_{xz}, G_{yz}, v_{xz}, v_{yz}$)
$\frac{(\sigma_x + \sigma_z)^2}{X_t^2} + \frac{\tau_{xz}^2 - \sigma_x \sigma_z}{S_{xz}^2} + \frac{\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2}{S_{xy}^2} \geq 1$	基体拉伸断裂 ($\sigma_x + \sigma_z > 0$)	$Q_d = 0.2Q$ ($Q = E_x, G_{xy}, G_{xz}, v_{xy}, v_{xz}$)
$\left[\left(\frac{X_c}{2S_{xz}}\right)^2 - 1\right]\left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{X_c}\right) + \frac{(\sigma_x + \sigma_z)^2}{4S_{xz}^2} + \frac{\tau_{xz}^2 - \sigma_x \sigma_z}{S_{xz}^2} + \frac{\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2}{S_{xy}^2} \geq 1$	基体压缩断裂 ($\sigma_x + \sigma_z < 0$)	$Q_d = 0.4Q$ ($Q = E_x, G_{xy}, G_{xz}, v_{xy}, v_{xz}$)
$\left(\frac{\sigma_y}{Y_t}\right)^2 + \frac{\tau_{xz}^2 - \sigma_x \sigma_z}{S_{xz}^2} + \frac{\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2}{S_{xy}^2} \geq 1$	纤维拉伸断裂 ($\sigma_y > 0$)	$Q_d = 0.07Q$ ($Q = E_y, G_{xy}, G_{yz}, v_{xy}, v_{yz}$)
$\left(\frac{\sigma_y}{Y_c}\right)^2 \geq 1$	纤维压缩断裂 ($\sigma_y < 0$)	$Q_d = 0.14Q$ ($Q = E_y, G_{xy}, G_{yz}, v_{xy}, v_{yz}$)

元模拟显示,在内压接近结构承载极限时,结构才开始出现纤维破坏。当出现纤维破坏时,材料失效体积迅速增加,整体结构迅速破坏。图6为43.5 MPa内压下,即实测极限承载压力下,缠绕层内的环向应变云图。图7为同一压力下管壁缺陷部位 Von Mises 应力云图。可见,此时缺陷部位管线钢应力很高,已接近发生塑性垮塌,而缺陷上方复合材料的应变明显高于其他区域,且已发生纤维破坏。这与图3所示的极限承载试验结果一致。管体缺陷处的局部高应变导致缺陷外表面的复合材料缠绕层发生局部破坏,不同于 COPV 均匀高应变所致的大面积破坏。

模拟结果还显示,直到缺陷处的管壁钢材超过强度极限,补强层中的复合材料也未出现基体和层间破坏。对水压涨破试验后的修复管道进行检测,在纤维没有拉断的区域,复合材料表面也没有发现

可以识别的龟裂和疏松现象,即未显示出基体和界面破坏的迹象。补强的缠绕层通常仅含沿管道环向的纤维,缠绕层的轴向模量相当小,不足管壁钢材弹性模量的2%。尽管试验管道为加载内压封堵了两端,管壁会因此承受轴向拉伸,但缠绕层所分担的轴向荷载是很有限的。在不同内压下,轴向应力均不足环向应力的10%。缠绕层各处的剪应力也很小,不超过环向应力的5%,没有发生基体破坏和界面破坏的条件。

在不同内压下,累计的失效复合材料体积与缠绕层总体积的比率关系见图8。缠绕层内复合材料的渐进失效可分为两个阶段。第一阶段,在14 MPa内压下开始出现复合材料失效,内压增加到40 MPa之前,失效材料的体积随内压升高而缓慢增加,这是低速失效阶段。第二阶段,在内压超过40 MPa之后,同等内压增量下,缠绕层失效体积的增加明显加快,直到结构破坏。图8中关系曲线的陡然上升即为加速失效阶段。尽管在14 MPa内压下,复合材料开始失效,但内压增加了26 MPa后,才进入加速失

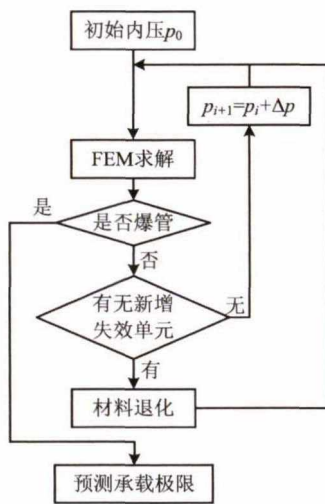


图5 渐进失效的有限元分析求解流程

Fig. 5 Flow chart of gradual failure in finite element analysis

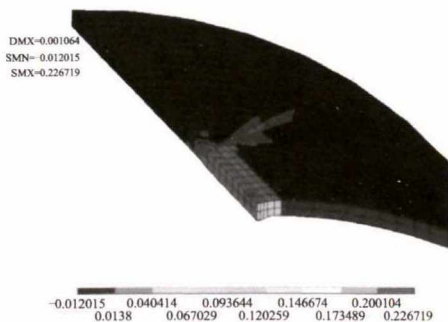


图6 模拟应变云图

Fig. 6 Simulated strain contour

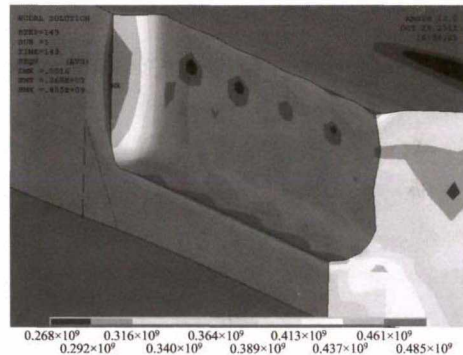


图7 缺陷区域管壁的 Von Mises 应力云图(单位:MPa)

Fig. 7 Von Mises equivalent stress distributions of defect region (unit in MPa)

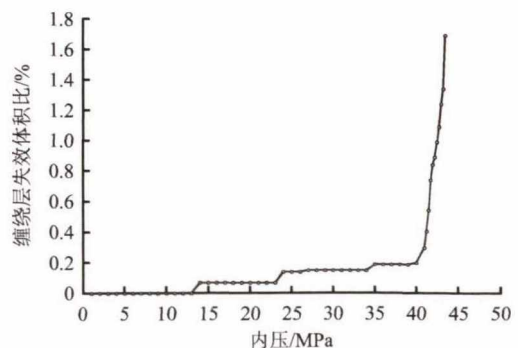


图8 缠绕层失效体积比-内压关系曲线

Fig. 8 Volume ratio of failed composites vs inner pressure

效阶段。管道工业中,普遍认为计算失效情况的临界压力是很有必要的^[16]。而针对复合材料缠绕补强,若以复合材料初始失效压力 14 MPa 作为补强管道的“临界压力”,将严重低估复合材料的补强效果。下文将针对这一问题做进一步研究。

4 基于缠绕层表面应变演化的临界压力确定

如第 3 节所述,在内压超过 40 MPa 后,复合材料渐进失效进入了加速阶段。在内压增量不足 10% 之后,补强管道即发生破坏(爆管)。因而理论上,将复合材料渐进失效低速/加速阶段的转变压力 40 MPa 作为补强管道的临界压力最为合理。考虑到工程上应用的实用性,临界压力应当与便于测量的力学指标联系起来。通过对模拟结果的分析,可根据复合材料外表面环向应变的演化趋势确定补强管道临界压力。

以缺陷中心正上方缠绕层外表面为基准点,建立沿管道轴向远离基准点的坐标 d , 见图 6。由于有限元模型为 1/4 模型,如前述,因此 d 的原点位于模型中两对称面的交界处。取 d 坐标轴上间距 10 mm 的系列点作为应变测点。在实际补强管道中,缠绕层外表面的应变监测已有应用^[4,6]。以模拟应变代替实际管样的应变测试结果,建立临界压力的确定模式。

距缠绕层外表面基准点不同位置(不同 d 坐标)的环向应变-内压关系曲线如图 9 所示,在内压 38~40 MPa 之间,缠绕层外表面环向应变的增长趋势突然加剧。对照图 8 可知,复合材料渐进失效低速/加速阶段的转变压力与测点环向应变演化趋势的转变压力几乎重合。应当指出,采用单一测点的应变演化表征临界压力存在偏差。由图 9 可见,缺陷中心正上方处($d=0$ 测点)的环向应变自内压 27

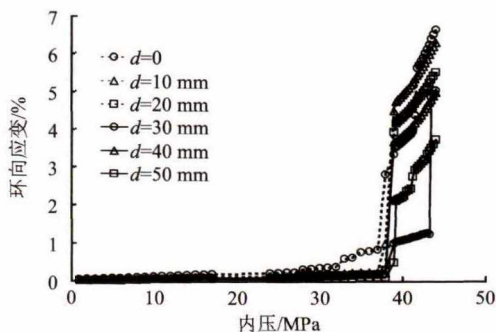


图 9 模拟环向应变演化

Fig. 9 Simulated circumferential strain evolution

MPa 起即呈现一定非线性,这是该测点下方区域复合材料低速渐进失效的结果。但不同 d 坐标测点的应变演化可以相互印证,消除部分测点的偏差。综合分析整个缺陷上方测点的应变数据,可确定补强管道的临界压力。

5 结论

本文开展了复合材料补强管道的极限承载试验和渐进失效模拟研究,得出以下结论。

1) 由于管道缺陷的局部效应和剩余强度,其渐进失效历程与复合材料压力容器截然不同。模拟结果反映出以纤维破坏为特征的缠绕层破坏模式。

2) 缠绕层在一个较长的历程中渐进破坏,复合材料的渐进失效分为稳定缓慢失效和急剧加速失效两个阶段。在缓慢失效阶段,由复合材料承担的荷载在纤维断裂后逐步转由周围完好纤维和管道缺陷的剩余壁厚承受,缠绕层仍具有重要的补强作用;进入加速失效阶段后,缠绕层的补强作用迅速减弱,最后导致缺陷处的金属管壁爆裂。

3) 提出了补强管道“临界压力”的确定方法,为复合材料补强管道的设计提供了参考。

References (参考文献):

- [1] SHAMSUDDOLA M, ISLAM M M, ARAVINTHAN T, et al. Effectiveness of using fibre-reinforced polymer composites for underwater steel pipeline repairs [J]. *Composite Structures*, 2013, 100(12): 40-45.
- [2] ASME. PCC-2 Repair of pressure equipment and piping [S]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2011: 139-185.
- [3] TOUTANJI H, DEMPSEY S. Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composites materials [J]. *Thin-Walled Structures*, 2001, 39(2): 153-165.
- [4] FREIRE J L F, VIEIRA R D, DINIZ J L C. Effectiveness of composite repairs applied to damaged pipeline [J]. *Experimental Techniques*, 2007, 31(1): 59-66.
- [5] SHUAI Jian (帅健), LIU Wei (刘惟), WANG Junqiang (王俊强), et al. Stress analyses of repaired pipelines by enwrapping composite materials [J]. *Acta Petrolei Sinica (石油学报)*, 2013, 34(2): 372-379.
- [6] DUELL J M, WILSON J M, KESSLER M R. Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85(11): 782-788.
- [7] LEE C S, KIM J H, KIM S K, et al. Initial and progressive failure analyses for composite laminates using Puck failure criterion and damage-coupled finite element method [J]. *Composite Structures*, 2015, 121(1): 406-419.

- [8] LIU P F, ZHENG J Y. Progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite laminates using continuum damage mechanics[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 485(5): 711–717.
- [9] LEH D, SAFFRE P, FRANCESCATO P. A progressive failure analysis of a 700-bar type IV hydrogen composite pressure vessel[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(6): 13206–13214.
- [10] ELLUL B, CAMILLERI D. The influence of manufacturing variances on the progressive failure of filament wound cylindrical pressure vessels[J]. *Composite Structures*, 2015, 133(3): 853–862.
- [11] WANG L, ZHENG C, LUO H. Continuum damage modeling and progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite pressure vessel[J]. *Composite Structures*, 2015, 134(4): 475–482.
- [12] WANG Junjie(王军杰), JIANG Jinmao(蒋劲茂). Study on dynamic simulation of roll forming of ERW pipes[J]. *Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*, 2007, 14(5): 23–25.
- [13] KNOPS M, BOGLE C. Gradual failure in fibre/polymer laminates[J]. *Composite Science and Technology*, 2006, 66(4): 616–625.
- [14] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(3): 29–34.
- [15] LIU Qun(刘群), ZHOU Xihe(周锡河). Preliminary risk assessment of second Shaanxi-Beijing natural gas pipeline[J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2005, 5(1): 97–100.
- [16] FENG Xinxin(冯欣鑫), YU Yang(余杨), XU Lixin(徐立新), et al. Critical failure pressure of submarine pipeline with double corrosion defect[J]. *China Offshore Platform(中国海洋平台)*, 2018, 33(5): 87–94.

On the slow-going gradual failure analysis of the composite structure in the repaired pipeline

WANG Yan-yu¹, LI Can², CHENG Zhi-qiang¹

(1 Applied Mechanics and Structure Safety Key Laboratory of Sichuan Province, School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2 PetroChina West-to-East Gas Pipeline Company, Nanjing 210002, China)

Abstract: The present article intends to trace and examine the gradual failure of the composite materials in a repaired pipe. To achieve the goal of our research, we have conducted a series of burst or breaking experiments by using a pipe specimen with a volume defect, to which a glass composite fiber can be applied to the burst system through rehabilitating tests. Our experimental

results demonstrate that the failure process of the composite strata of the layers in the overwrapping rehabilitating system can be greatly different from those in a composite overwrapped pressure vessel (COPV). To achieve the research goal, we were managing to simulate the gradual failure processes of the composite materials with properties of steel, the filler obtained through the strict material strength tests or from the references, with the finite element model consisting both of the pipe specimen and composite layers of the rehabilitating system. The simulation test has to involve Hashin failure criterion and the relevant rigidity deteriorating method. The ultimate pressure of the specimen obtained by FEM should be in nice agreement with the burst experiment results, whereas the simulation results are likely to manifest that the characteristic failure mode of the overwrapped layers may lie in the breakage of the tested fiber. And, what is more, the volume of the failure material at each pressure stage can also be made clear in the FEM simulation, which can likely reveal that the gradual failure of the composite material can be divided into 2 stages: the stable slow propagation and the abrupt or sharply resulted prompt propagation, in spite that such a kind of 2-stage phenomenon of getting broken may not have been noticed and/or stated in the subject of COPV. Nevertheless, with the help of FEM simulation, it would be possible to find and account for such a kind of 2-stage breaking phenomenon. And, what is more, it would be easy to analyze and find the effects of such a kind of gradual failure. Hence, may the volume of the failure composite be quite small, the failure process and result can still affect the effectiveness of the rehabilitating system. And, furthermore, the stress level or greatness in the pipe defect can be said acceptable in the process of the slow failure propagation. However, if the damage evolution tends to speed up and get more and more serious, the stress *status-in-situ* of the pipe may get soon be deteriorated. And, therefore, based on the circumferential strain evolution of the composite layer on the outer surface, the paper would like to propose a novel method to determine the critical pressure of the reinforced pipe in the paper, which proves to be valuable in the pressure design of the composite repairable airted pipelines.

Key words: safety engineering; pipeline; composite reinforcement; gradual failure; ultimate pressure test; critical pressure

CLC number: X45 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2020)03-0878-06