

文章编号: 1000-8241(2022)10-1168-07

钢丝缠绕增强聚乙烯复合管集输服役后的承压性能

徐广丽^{1,2} 秦绪¹ 陈全¹ 蔡亮学^{1,2}

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院; 2. 油气消防四川省重点实验室

摘要: 为探明钢丝缠绕增强聚乙烯复合管(简称复合管)在油田集输环境服役后的极限承压,以长庆油田第四采油厂试用的4731B型复合管、第五采油厂试用的防垢型复合管为研究对象,采用100 MPa耐压爆破试验机分别对新管、服役后现场管进行2组瞬态水压爆破对比实验,分析了爆破口的特征形貌及爆破压力,并借助应变数据采集系统记录爆破过程中管道不同位置的瞬时应变。结果表明:该类型复合管服役后的平均瞬时爆破压力有所降低,爆破口形貌发生显著变化,膨胀变形较新管显著增大;起爆前,应变随时间的变化分为零应变段、线性增长段、指数增长段共3个阶段;起爆后,应变发生振荡,直至稳定。究其原因可能是复合管施工期间钢丝与高密度聚乙烯基体之间的粘结剂局部失效所致。研究成果可为该类型复合管在集输油环境中服役时失效原因的分析提供借鉴。(图9,表3,参20)

关键词: 复合管; 承压性能; 爆破形貌; 瞬时应变; 实验研究

中图分类号: TQ 322.3

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.10.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Pressure bearing capacity of polyethylene composite pipe reinforced by steel wires after gathering service

XU Guangli^{1,2}, QIN Xu¹, CHEN Quan¹, CAI Liangxue^{1,2}

1. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University;

2. Oil & Gas Fire Protection Key Laboratory of Sichuan Province

Abstract: In order to clarify the ultimate pressure bearing capacity of polyethylene composite pipe reinforced by steel wires (hereinafter referred to as composite pipe) used for oil gathering in oilfields, a study was performed on 4731B composite pipe tried in No. 4 Oil Production Plant and the anti-scaling composite pipe tried in No. 5 Oil Production Plant of Changqing Oilfield. In the study, 2 groups of transient hydraulic fracturing experiment were performed respectively on the new pipe and the in-service pipe with a 100 MPa burst tester. Meanwhile, the break appearance and burst pressure were analyzed, and the instantaneous strains at different positions during the bursting process were recorded through a strain data acquisition system. The results indicate that the average instantaneous bursting pressure of this composite pipe in service is reduced to some extent, with the break appearance changed dramatically, and the expansion deformation increased significantly in comparison with the new pipes. Besides, the change of strain with time before bursting is divided into 3 stages, i.e., zero strain stage, linear growth stage and exponential growth stage. However, the strain after bursting oscillates until it is stabilized. The reason might be the local failure of adhesive between the steel wire and the high-density polyethylene matrix during the construction of composite pipe. These results could provide reference for the failure analysis of this type of composite pipe applied in oil gathering environment. (9 Figures, 3 Tables, 20 References)

Key words: composite pipe, pressure bearing capacity, break appearance, instantaneous strain, experimental investigation

随着非金属材料不断涌现及其性能的持续提升,非金属复合管在中国油田集输系统得到逐步应

用^[1],但推广中存在管道失效模式不明^[2]、使用期限难预测^[3]、设计制造检验等过程考虑尚不全面^[4]等问题。

为准确预测复合管服役期限、定量评价复合管剩余强度^[5],研究复合管在集输油环境服役后的极限承压能力很有必要。与油田回注水系统^[6]不同,集输管网输送介质为井口采出油与采出水^[7],管输介质成分复杂,使非金属复合管的应用环境更为恶劣,因此,在役复合管力学性能研究十分必要^[8]。有学者采用理论分析、实验研究、有限元模拟等手段研究了复合管的极限承压与失效形貌^[9-15],但其样管均为新管。然而,复合管在集输环境服役后,由于输送介质的渗透及溶胀,聚乙烯机械性能降低,甚至表面产生裂纹^[16],因此,有必要对集输环境服役后复合管的极限承压及失效形貌特征进行研究。

以钢丝缠绕增强聚乙烯复合管(简称复合管)为研究对象,参照 GB/T 15560—1995《流体输送用塑料管材液压瞬时爆破和耐压试验方法》,采用 100 MPa 耐压爆破实验机对长庆油田第四采油厂、第五采油厂油田集输系统分别服役 813 天、60 天的复合管及同一厂家生产的新管进行水压爆破对比实验,测试其爆破特征与形貌、极限承压及爆破过程中复合管瞬时应变,并与现有极限承压计算模型进行对比分析,以期为该类型复合管在集输油环境中服役前后的性能变化提供依据。

1 复合管水压爆破实验

1.1 实验材料

长庆油田进行工程性试用的钢丝缠绕增强复合管(图 1)由内衬层、增强层、外护层共 3 层组成,其中内衬层、外护层为同型号聚乙烯,增强层为统一规格钢丝,三者通过高性能粘结剂紧紧连接。其中,第四采油厂试用复合管设计压力为 6 MPa,采用进口 4731B 型聚乙烯;第五采油厂试用复合管设计压力为 4 MPa,采用国产防垢型聚乙烯。两厂试用的复合管均为常温输送管道,复合管内径均为 55 mm,壁厚 10 mm(内衬

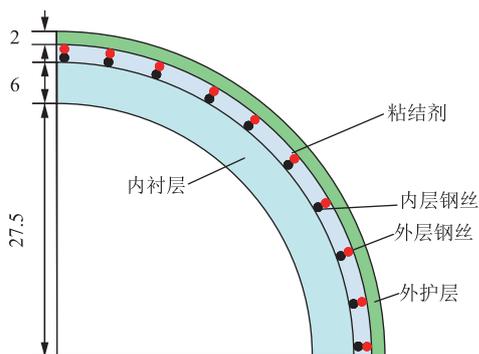


图 1 钢丝缠绕增强复合管 1/4 剖面结构示意图(mm)

层厚度 6 mm、外护层厚度 2 mm、钢丝内嵌层 2 mm)。高强度钢丝沿轴向左、右 55° 螺旋缠绕各 40 根,钢丝直径 0.8 mm。

为保障实验精准度,每组均设 2 个平行样,爆破机内置压力表精度大于 1 级,所有待测管壁面均无损伤。爆破测试管段根据工况差异共有 4 组(表 1),新管与现场管均为同一流水线生产。两类管材除基体材料不同外,成型过程完全相同。根据现场检测可得到第四、第五采油厂采出原油物性(表 2)。

表 1 爆破测试管段分组编号表

复合管类型	分组编号	使用工况	管编号
进口 4731B 型	A	新管	A1、A2
	B	第四采油厂现场服役 813 天	B1、B2
国产防垢型	C	新管	C1、C2
	D	第五采油厂现场服役 60 天	D1、D2

表 2 第四、第五采油厂采出原油物性表

采油厂名称	密度/(kg·m ⁻³)	凝点/°C	备注
第四采油厂	847.5	16	采出水为重碳酸钠水型
第五采油厂	835.7	15	

根据 GB/T 15560—1995 及 GB/T 6111—2018《流体输送用热塑性塑料管道系统耐内压性能的测定》,加压介质为温度偏差不得超过 2 °C 的室温水,测试管段总长 1 200 mm。采用新制 A1 型不锈钢螺纹密封接头硬性连接到测试管两端,一端密封接头留有加压孔。

1.2 实验设备及方法

复合管水压爆破实验系统(图 2)主要包括 3 部分:100 MPa 耐压爆破实验机、电阻应变片及应变数据采集系统、自制温度补偿管段。爆破实验机用于提高测试管段内压,使测试管发生短期爆破,并提取爆破时的压力峰值。电阻应变片及应变数据采集系统用于采集加压过程中测试管不同位置的瞬时应变,其中,应变

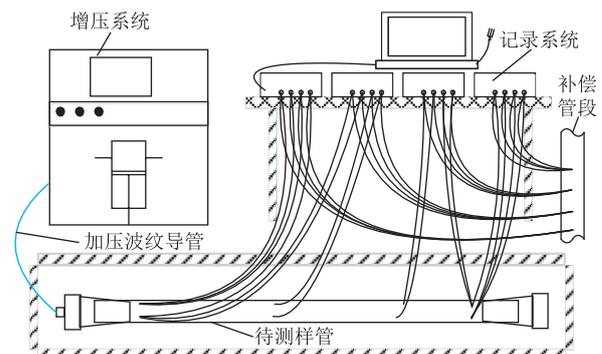


图 2 复合管水压爆破实验系统组成示意图

采集系统设置的采集频率为 51.2 kHz,应变片型号为 BF120-2CA。自制温度补偿管段用于消除环境温度变化对应变片电阻造成的影响。爆破试验机通过不锈钢加压管与待测样管带加压孔一侧相连,样管加压过程中不同位置的应变通过动态应变采集仪实时采集,直至样管发生爆破。

1.3 实验方法

复合管水压爆破的实验方法为:①管体清洁。使用石油醚擦拭管体表面的油污,然后将密封接头内有效测试管段 5 等分,并做标记以便应变片贴合。②粘贴应变片(图 3)。在 5 等分线上左右对称粘贴应变片,靠近密封接头端各设置 1 个三轴应变片,分别测试轴向、环向、45° 方向的瞬时应变;中部设置单轴应变片,用于测试 45° 方向的瞬时应变,并利用玻璃胶保护粘贴后的应变片。温度补偿管段采用相同方法粘贴应变片。③应变片检查。目测确保应变片无导线接触,使用万用表逐一核查应变片的有效性。④应变数据采集系统连接。利用导线将测试管段上的应变片与应变数据采集系统正极连接,将温度补偿管段上的应变片与应变数据采集系统负极连接。经计算矫正因子平衡后,示波采集准备,确保每个应变片信号通道正确连接。⑤瞬时爆破。测试管段一端装好密封接头后,将水缓慢注入并排出管内空气,再使用带有加压孔的密封接头进行密封,并通过不锈钢加压管将测试管段与爆破试验机连接。开启爆破试验机,借助往复泵将常温水持续注入爆破坑中的测试管段,直到管段爆破。⑥后处理。记录爆破时间及爆破压力,拆除导线并观察、记录管道膨胀变形情况。

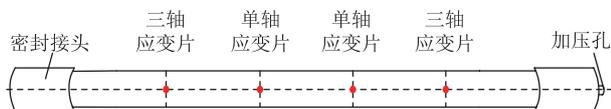


图 3 复合管水压爆破实验测试各管段应变片布置示意图

2 实验结果

2.1 爆破特征及形貌

复合管的承压能力由聚乙烯内衬层、钢丝增强层、聚乙烯外护层叠加而得^[17]。瞬时爆破过程中,随水压增加,管体发生膨胀,爆破时钢丝发出清脆断裂声,爆破后观察发现管体多处膨胀。以 B2 管为例,除爆破口发生不均匀膨胀外,管体还发生 5 处鼓包变形。根

据复合管水压爆破实验后各管段爆破口形貌图(图 4)可见,爆破口边缘均呈撕裂状,可知复合管发生韧性破坏;服役后的复合管爆破口较新管发生显著变化:进口 4731B 型复合管新管爆破口为轴向,整个爆破口呈“一”形(图 4a、图 4b)。进口 4731B 型复合管服役后管爆破口两端保持轴向;中部为斜型切口,与轴向呈 30°~45°;整个爆破口呈“Z”形,且管体膨胀变化显著增大(图 4c、图 4d)。国产防垢型复合管新管爆破口呈“Z”形(图 4e、图 4f);国产防垢型复合管服役后管爆破口变为“U”形(图 4g、图 4h)。所有爆破口轴向长度均在 100~200 mm 之间,爆破口距密封接头端面的最小距离依次为 295 mm、430 mm、425 mm、305 mm、250 mm、84 mm、288 mm、358 mm。爆破后钢丝在爆破水压作用下冲出管体表面,钢丝截面断裂不齐且断面存在明显的拉伸缩颈现象。

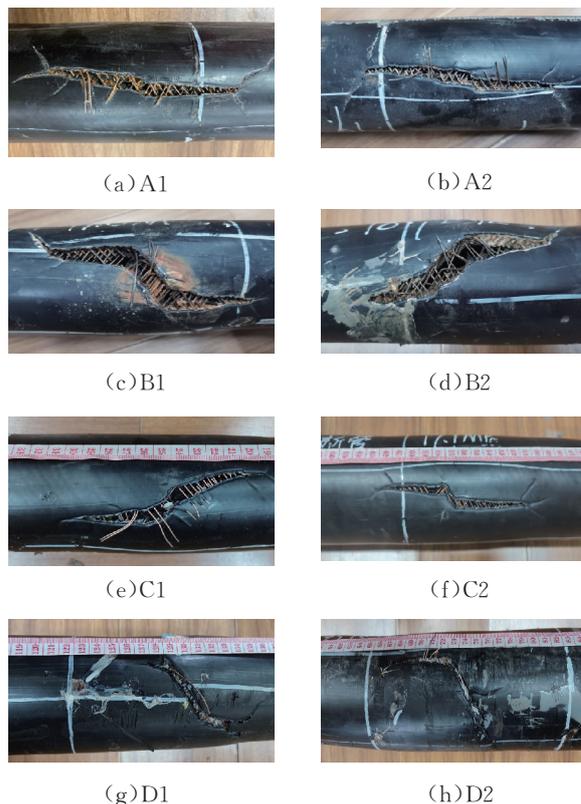


图 4 复合管水压爆破实验后各管段爆破口形貌图

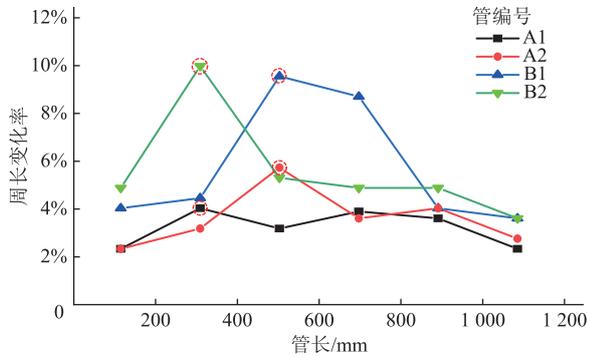
采用软尺测量管段端点以及 5 等分位置处的周长 c ,利用周长变化率 C 表征爆破后管体膨胀的程度,周长变化率的表示为:

$$C = \frac{c - \pi d_{ave}}{\pi d_{ave}} \times 100\% \quad (1)$$

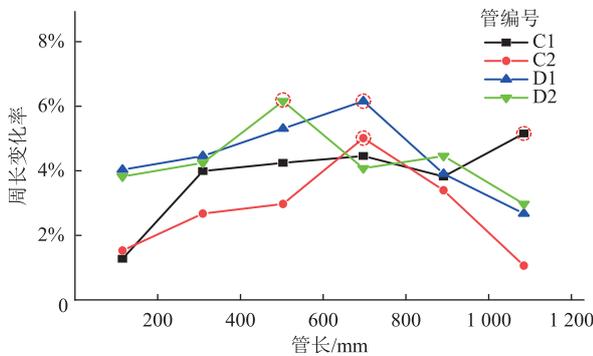
式中: d_{ave} 为测试管段爆破前的平均外径,mm。

测量得到各测试管段 6 个位置处(管段两端点及

5等分位置处)的周长变化率(图5)。可见,爆破后管体整体发生不均匀膨胀,管体周长变化率在爆破口(图5红色虚线圈出)附近最大,且服役后的复合管膨胀变形显著大于新管。



(a) 进口4731B型



(b) 国产防垢型

图5 爆破后两种复合管不同位置处的周长变化率图

2.2 爆破压力

根据复合管水压爆破实验得到进口4731B型、国产防垢型复合管极限承压(表3)。两种复合管新管极限承压稳定,分别为19.70 MPa、20.35 MPa,对应为设计压力的3.28倍、5.1倍,满足SY/T 6662.2—2020《石油天然气工业用非金属复合管第2部分柔性复合高压输送管》关于极限承压的规定;各平行样爆破压力与其平均值之间的相对误差很小,最大误差为0.26%。取两种复合管的基体聚乙烯试样进行力学拉伸测试,得

表3 服役前后两种复合管瞬时爆破压力表

分类	管段编号	爆破压力/ MPa	平均值/ MPa	相对误差
进口 4731B型	A1	19.7	19.70	±0.00%
	A2	19.7		
	B1	19.0	18.95	±0.26%
	B2	18.9		
国产防垢型	C1	20.3	20.35	±0.25%
	C2	20.4		
	D1	18.5	18.50	±0.00%
	D2	18.5		

到其应力-应变曲线(图6),可见,国产防垢型聚乙烯的屈服强度、断裂伸长率更优,因而国产防垢型复合管新管的承压强度比进口4731B型复合管高。

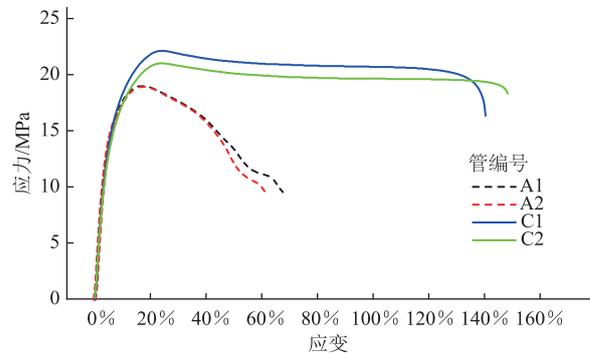


图6 两种复合管基体聚乙烯应力-应变曲线

由表3可知,进口4731B型、国产防垢型复合管服役后管的极限承压稳定,分别为18.95 MPa、18.50 MPa,降为其新管的96.2%、90.9%,而其服役时长对应为813天、60天。服役后复合管承压降低的原因可能有:①井口采出原油及采出水渗透、扩散引起的聚乙烯性质改变、裂纹产生^[18]、钢丝腐蚀等;②复合管敷设时刚性连接引起的初始应力、服役期间压力扰动导致聚烯烃分子链松弛或断裂,进而产生缺陷;③复合管施工过程中折弯,使复合管内粘结剂局部失效,使得内衬层、增强层与外护层出现局部分层,导致钢丝承压性能不均匀。前两者解释的极限承压降低均与服役时长呈正比关系,而服役813天的进口4731B型复合管降低3.8%、服役60天的国产防垢型复合管降低9.1%,因此,推测服役后复合管极限承压降低的原因可能为粘结剂失效导致钢塑界面松弛。

由于结构特殊,现有塑料管强度计算方法并不适用于复合管^[19]。按照轴向载荷平衡条件和缠绕特征,朱彦聪等^[20]认为复合管爆破压力 p_b 为轴向爆破压力 p_b^z 与环向爆破压力 p_b^0 的较小值。若轴向强度大于环向强度,复合管就发生环向爆破,反之发生轴向爆破。复合管爆破压力的表达式为:

$$p_b = \min(p_b^z, p_b^0) \quad (2)$$

$$p_b^0 = \frac{nd_s^2(\sigma_g \sin^2 \alpha - \sigma_p)}{4d_i(d_i + d_o)\cos \alpha} + \sigma_p \left(\frac{d_o}{d_i} - 1 \right) \quad (3)$$

$$p_b^z = \frac{nd_s^2(\sigma_g \cos^2 \alpha - \sigma_p)}{4d_i^2(d_i + d_o)\cos \alpha} + \sigma_p \left[\left(\frac{d_o}{d_i} \right)^2 - 1 \right] \quad (4)$$

式中: n 为钢丝总根数,根; d_s 为钢丝直径,mm; α 为钢丝缠绕夹角, $(^\circ)$; σ_g 、 σ_p 分别为钢丝、聚乙烯的极限强度,MPa; d_i 、 d_o 分别为复合管内径、外径,mm。

依据长庆油田试用复合管供货商提供的钢丝性能, 钢丝拉伸强度 σ_g 为 2 000 MPa。假设新管钢塑界面粘结效果优良, 钢丝与聚乙烯变形量相同, 因此, σ_p 取钢丝断裂延伸率为 5% 时进口 4731B 型、国产防垢型聚乙烯的拉伸强度, 分别为 14 MPa、15 MPa。

将 $n=80$ 根、 $d_s=0.8$ mm、 $\alpha=55^\circ$ 、 $d_i=27.5$ mm、 $d_o=37.5$ mm 代入式(3)、式(4), 通过计算可得到进口 4731B 型新管、国产防垢型新管的爆破压力值分别为 21.7 MPa、22.0 MPa, 二者与实测值的绝对误差分别为 2.0 MPa、1.65 MPa, 预测爆破口方向为环向, 与实测结果偏差较大, 说明式(2)~式(4)能较好地预测爆破压力。其他参数不变, 仅偏离角度改变的条件下, 由式(3)、式(4)可计算得到复合管中钢丝的缠绕角度与爆破压力的关系曲线(图 7)。可见, 缠绕角度小于 60° (两曲线交点处, 即最佳缠绕角度) 时, 爆破压力取环向爆破压力; 缠绕角度大于 60° 时, 爆破压力取轴向爆破压力。长庆油田试用复合管钢丝缠绕角度为 55° , 小于最佳缠绕角度, 因此, 爆破压力取环向爆破压力, 预测爆破口为环向。这与实测轴向爆破口不一致, 可能因为钢丝断裂伸长率远低于聚乙烯, 爆破加压过程中, 聚乙烯和钢丝往往不能同时在最佳受力区间, 层间弹塑性相互作用变得复杂。因此, 理论模型预测瞬时爆破压力较为准确, 但预测爆破口形貌较为粗略。

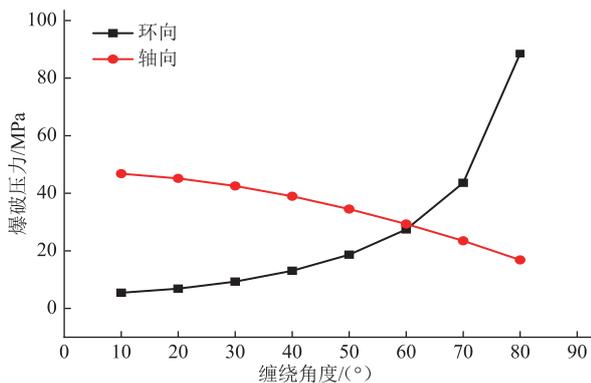
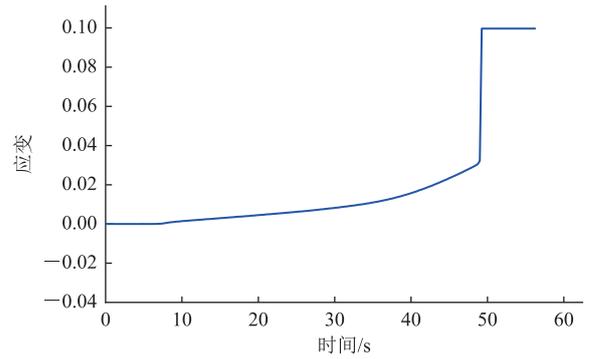


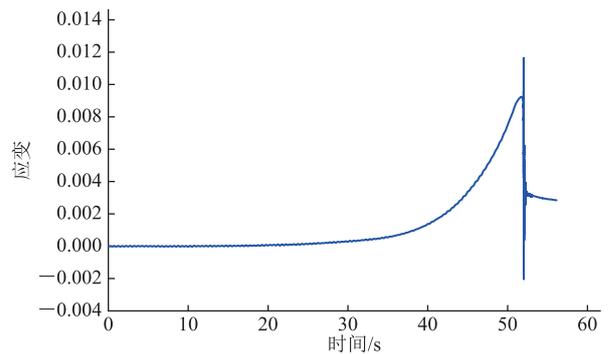
图 7 复合管中钢丝的缠绕角度与爆破压力关系曲线

2.3 瞬时应变

爆破过程中, 随测试管段内压增大, 管段由弹性变形向塑性变形过渡, 最终过度膨胀直至起爆。采用应变数据采集系统记录了爆破过程中不同位置处应变随时间的变化, 具体可分为两类(图 8): ①前期应变变化极小, 中期以线性速率增大, 后期以指数速率增大, 起爆瞬间急速增至最大, 直到爆破口完全撕开(图 8a)。其原因为起爆后实际应变超出应变片承受范围, 应变



(a) 第 1 类



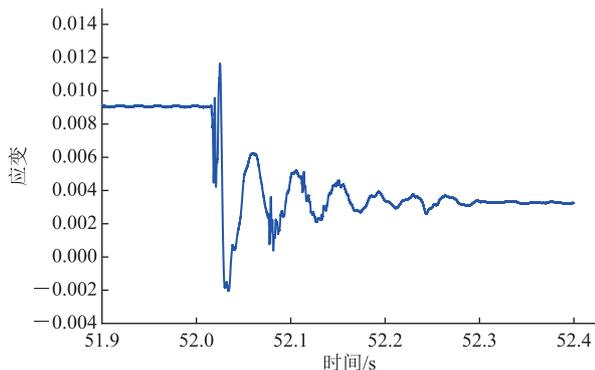
(b) 第 2 类

图 8 爆破过程中不同位置处两类应变随时间的变化曲线

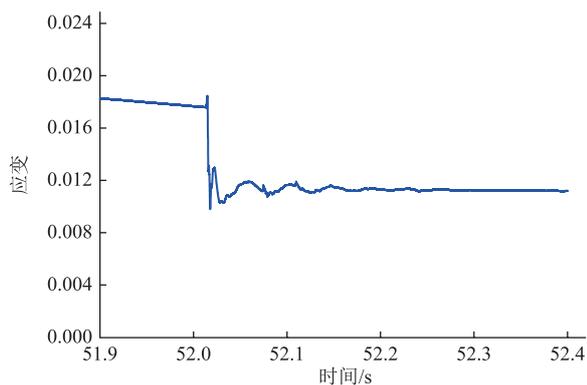
片被拉断。环向、 45° 方向应变出现此类曲线。②前期应变变化极小, 中期以线性速率增大, 后期以指数速率增大, 起爆后应变发生短期振荡, 钢丝、聚乙烯管体依次撕裂后呈现阻尼振荡, 最终趋于稳定(图 8b)。轴向、环向、 45° 方向应变出现此类曲线。此外, 服役后复合管轴向应变出现负值, 说明管段某些位置在爆破过程中轴向受挤压, 这是由于现场管存在弯曲变形, 加压过程产生弯矩。

以 B2 管为例, 其远离爆破口一侧三轴应变片的环向应变(图 8a)、轴向应变(图 8b)可知, 环向应变显著大于轴向应变; 爆破发生前, 应变随时间的变化可归纳为零应变段 0~20.5 s、线性增长段 20.5~32 s、指数增长段 32~52 s 共 3 段; 起爆后, 应变若在应变片测量范围内, 应变发生剧烈振荡, 直至爆破结束; 反之, 若超出应变片最大测量值, 应变片就被拉断。由图 8b 可知: 零应变段管段内部由于含有空气而压力增长缓慢, 压力的增加被大间距空气分子及塑料弹性变形所吸收; 线性增长段、指数增长段内, 管段因内压增大而发生膨胀, 应变随时间先线性、后指数增大; 52~56 s, 钢丝断裂, 聚乙烯管体被撕开, 管段爆破失效。为分析爆破过程的瞬时特性, 将图 8b 中 52 s 处曲线局部放大(图 9)。可见, 应变最大时钢丝断裂, 失去增强作用, 聚乙烯在

极短时间内开裂并释放压力;随后复合管应变发生剧烈振荡,聚乙烯随冲出水膨胀到最大后收缩并凹陷,收缩后再次轻微膨胀,0.3 s 后应变趋于稳定。根据图 9a 中同一位置、相同时间内 45° 方向的应变曲线(图 9b)可知,45° 方向应变显著大于轴向应变;起爆后,应变发生振荡,0.2 s 后趋于稳定,但振荡幅值较小,稳定后的应变更大。



(a) 52 s 处



(b) 52 s 且 45° 方向处

图 9 B2 管远离破口侧三轴应变片 52 s 处与相同位置的 45° 方向处应变随时间的变化对比图

3 结论

通过对进口 4731B 型、国产防垢型钢丝缠绕增强复合管的新管及现场服役管进行爆破实验发现,新管、现场管的爆破口均呈撕裂状,为韧性失效的轴向破坏;现场管爆破形貌较新管有明显变化,膨胀变形显著大于新管;前人提出的复合管爆破压力预测公式能较好地预测短时爆破压力,但预测爆破口方向有较大偏差;应变随时间均出现零应变段、线性增长段、指数增长段共 3 个阶段,起爆后,应变短期内发生剧烈振荡,直至最终趋于稳定。现场服役后复合管极限承压的降低与服役时长不呈正比关系,推测其原因与粘结剂的局部失效有关,应尽量避免管道施工过程中的过度弯折,

以减少粘结剂局部失效。未来应进一步研究粘结剂失效、聚乙烯基体老化等因素对复合管承压性能的影响,以明确复合管在油田集输服役时的失效机理。

参考文献:

- [1] 苏海平. 非金属管道在苏里格气田集输系统中的应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
SU H P. Investigation of non-metal pipeline gathering and transportation application in Sulige Gas Field[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [2] 刘冬梅, 张志宏, 孙海礁, 肖雯雯. 塔河油田非金属管材应用与认识[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(9): 77-80.
LIU D M, ZHANG Z H, SUN H J, XIAO W W. Nonmetallic tubing and understanding of Tahe Oilfield[J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(9): 77-80.
- [3] 孙彦虎. 集输管道腐蚀期限预测方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015.
SUN Y H. Study on the method of predicting the corrosion period of gathering and transportation pipelines[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015.
- [4] 杨专钊, 李安强, 魏亚秋. 双金属复合管标准发展现状及存在的问题[J]. 油气储运, 2020, 39(4): 395-399.
YANG Z Z, LI A Q, WEI Y Q. Development status and existing problems of standards for bimetal composite pipe[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(4): 395-399.
- [5] 齐国权, 丁楠, 李厚补, 邵晓东. 柔性复合管剩余强度试验及失效机理研究[J]. 石油管材与仪器, 2018, 4(5): 47-50.
QI G Q, DING N, LI H B, SHAO X D. Failure mechanism research and residual strength test of flexible composite pipe[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2018, 4(5): 47-50.
- [6] 邴绍献, 赵伟, 李振泉, 肖武, 吕琦, 侯春华. 油田注水开发系统能耗整体优化方法[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 102-106.
BING S X, ZHAO W, LI Z Q, XIAO W, LYU Q, HOU C H. Global optimization method of energy consumption in oilfield waterflooding system[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 102-106.
- [7] 黄雪松, 李思, 朱宁宁, 晁凯, 范开峰. 中原油田东濮老区高含水原油常温集输技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(16): 6681-6689.
HUANG X S, LI S, ZHU N N, CHAO K, FAN K F. Normal temperature gathering and transportation technology of high water-cut crude oil in Dongpu oil region of Zhongyuan Oilfield[J].

- Science Technology and Engineering, 2021, 21(16): 6681-6689.
- [8] 梁爱国, 齐傲江, 王飞, 李彬. 钢骨架塑料复合管带压开孔的有限元模拟[J]. 油气储运, 2020, 39(1): 99-103.
- LIANG A G, QI A J, WANG F, LI B. Finite element simulation of the hot tapping for steel framed plastic composite pipe[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 99-103.
- [9] GAO L, LIU T, SHAO Q Q, FANTUZZI N, CHEN W. Burst pressure of steel reinforced flexible pipe[J]. Marine Structures, 2020, 71: 102704.
- [10] ZHENG J Y, LI X, XU P, LIN X F, LI Y X. Analyses on the short-term mechanical properties of plastic pipe reinforced by cross helically wound steel wires[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009, 131(3): 031401.
- [11] ZHENG J Y, SHI J, SHI J F, ZHONG S J, RAO J, LI G Z, et al. Short-term burst pressure of polyethylene pipe reinforced by winding steel wires under various temperatures[J]. Composite Structures, 2015, 121: 163-171.
- [12] ZHENG J Y, GAO Y J, LI X, LIN X F, LU Y B, ZHU Y C. Investigation on short-term burst pressure of plastic pipes reinforced by cross helically wound steel wires[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2008, 9(5): 640-647.
- [13] XIONG H C, BAI Y, FANG Q, TANG G. Analysis on the ultimate bearing capacity of plastic pipe reinforced by cross-helically winding steel wires under internal pressure[J]. Ships and Offshore Structures, 2018, 13(S1): 264-272.
- [14] 张学敏, 周腾, 李厚补, 王品, 袁战伟, 肖春红. 涤纶纤维增强聚乙烯复合管承压性能模拟[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(8): 118-122, 129.
- ZHANG X M, ZHOU T, LI H B, WANG P, YUAN Z W, XIAO C H. Simulation of pressure-bearing performance of polyester fiber reinforced polyethylene composite pipes[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8): 118-122, 129.
- [15] 齐国权, 戚东涛, 李循迹, 魏斌, 毛学强, 李厚补. PET纤维增强柔性复合管耐高温性能实验[J]. 油气储运, 2015, 34(6): 616-620.
- QI G Q, QI D T, LI X J, WEI B, MAO X Q, LI H B. High temperature performance test of PET fiber-reinforced flexible composite pipe[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(6): 616-620.
- [16] 蔡亮学, 朱国承, 池坤, 徐广丽. 长庆油田4731B型非金属材料集输管道老化特性实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(6): 16-22.
- CAI L X, ZHU G C, CHI K, XU G L. Experimental study on aging characteristics of 4731B non-metal gathering pipelines in Changqing Oilfield[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(6): 16-22.
- [17] 程小平. 钢骨架塑料复合管性能分析与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- CHENG X P. Analysis and study on properties of steel framed polyethylene plastic pipes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [18] 徐广丽, 田雨, 牛振宇, 蔡亮学. 聚乙烯对油田加热集输工艺的适用性[J]. 塑料工业, 2021, 49(1): 105-109, 153.
- XU G L, TIAN Y, NIU Z Y, CAI L X. Applicability of polyethylene to the heating gathering process in the oilfield[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(1): 105-109, 153.
- [19] 卢玉斌, 马歆, 方晓斌, 陈志伟, 郑津洋, 邱水录. 塑料基金属复合管研究进展[J]. 化工机械, 2005, 32(2): 125-129.
- LU Y B, MA X, FANG X B, CHEN Z W, ZHENG J Y, QIU S L. Research progress of plastic base metal composite pipes[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2005, 32(2): 125-129.
- [20] 朱彦聪, 郑津洋, 卢玉斌, 林秀锋, 李翔, 董华章, 等. 钢丝缠绕增强塑料复合管短期爆破压力试验研究[J]. 中国塑料, 2006, 20(5): 49-52.
- ZHU Y C, ZHENG J Y, LU Y B, LIN X F, LI X, DONG H Z, et al. Experimental investigation on short-time burst pressure of plastic pipes reinforced by cross helically wound steel wires[J]. China Plastics, 2006, 20(5): 49-52.

(收稿日期: 2021-07-29; 修回日期: 2022-03-30; 编辑: 张雪琴)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“地形起伏管道油流携水机理研究”, 51606160; 中央高校基本科研业务费专项资金项目“原油集输非金属材料老化特性研究”, 19CX05007A。

作者简介: 徐广丽, 女, 1984年生, 副教授, 2011年博士毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 现主要从事非金属材料适用性评价、多相流动保障、油气管道内检测器研发等方面的工作。地址: 四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学, 610500。电话: 18980449383。Email: 530xugl@163.com