

含缺陷管道碳纤维复合材料补强数值模拟研究

周云, 王琪, 王一宁

(江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京 210036)

摘要: 当代石油、天然气等能源的主要运输方式为管道运输, 管道在长期使用时会产生各种缺陷, 这些缺陷将对管道的结构和强度产生影响。目前先进的管道修复技术为复合材料补强技术, 其中碳纤维复合材料是较优的选择。为了测试有/无碳纤维补强管道缺陷处的效果, 开展了不同层数碳纤维复合材料的拉伸实验研究, 结合 ANSYS 数值模拟探究了修复前后不同缺陷管道在承载时的应力、应变分布, 分析了修复补强效果的影响因素。结果表明: 缺陷减薄厚度对管道的应力、应变状态影响较大, 碳纤维复合材料修复技术能在减小管道缺陷处应力、应变的同时优化其应力、应变分布, 可以通过增加碳纤维修复层数来提升修复效果, 相关研究对于管道的修复补强有一定指导意义。

关键词: 承压管道; 局部缺陷; 复合材料; 碳纤维补强; 数值模拟

中图分类号: TQ 055.81

文献标志码: A

文章编号: 1009-3281 (2024) 03-0084-010

随着经济的快速发展, 工业生产对于能源的需求日益增长, 越来越多的管道应用于石油天然气的开采和运输^[1]。随着服役时间的增加, 管道会因为腐蚀、陈旧、损伤等因素产生各种不同的缺陷, 从而影响管道强度, 对管道的安全造成威胁^[2-4]。因此, 研究管道修复技术, 对于不同类型的缺陷进行补强修复, 从而保证管道的完整性与安全使用, 降低维护成本, 具有现实意义和经济效益^[5]。

针对含缺陷管道, 主要的修复补强技术有焊接、夹具和碳纤维复合材料补强三种^[6-7]。相比于前两者, 碳纤维复合材料补强具有不动火、不焊接、耐腐蚀、安装简易等特点, 修复期间不影响管道运输, 修复后不降低运输能力, 使得其愈发受到国、内外专家们的青睐^[8-11]。

国内外学者针对复合材料修复技术开展了大量的研究, Shouman 等^[12]通过试验研究了组合载荷工况下复合材料修复管道的拉压极限。Duell 等^[3]利用爆破试验结合有限元模拟验证了复合材料对缺陷管道的修复效果。孟祥进等^[13]在理论计算分析的基础上, 通过爆破实验证明了碳纤维材料对含缺陷管道补强的可行性, 并讨论了包裹层数对补强的影响。李宝荣^[14]等基于水压爆破试验结果, 通过对加压过程的有限元模拟证明了碳纤维复合材料能有效地修复管

道缺陷, 恢复缺陷处的承压能力。然而, 关于不同缺陷的分类比较及复合材料修复前后强度分析的研究相对较少。因此, 本文通过有限元模拟, 探究不同缺陷类型下管道经复合材料修复前后的强度, 研究其应力分布及补强效果, 为碳纤维复合材料修复技术在实际工程中的应用提供理论支撑。针对不同情况下管道的复合材料修复技术及修复效果进行研究, 能为碳纤维复合材料修复技术的应用与推广提供支持, 具有工程意义及应用价值^[15-16]。

1 实验材料测定

1.1 缺陷管道材料的力学性能测试

本工作中采用的圆筒试件是 20 号钢无缝钢管, 从钢管中选取部分加工成标准拉伸试样, 在电子万能材料试验机上进行试样的室温拉伸试验, 试样长度为 165 mm。对试验所得数据进行处理分析并绘制真实应力-应变曲线, 如图 1 所示, 获得 20 号钢的屈服强度为 324.5 MPa, 抗拉强度为 550 MPa。

收稿日期: 2022-09-22

基金项目: 国家市场监督管理总局项目 (2020MK036); 江苏省特种设备安全监督检验研究院院内项目 (KJ(Y)2020031)。

作者简介: 周云 (1981—), 男, 高级工程师, 硕士。主要从事压力管道检验及压力管道元件型式试验等。

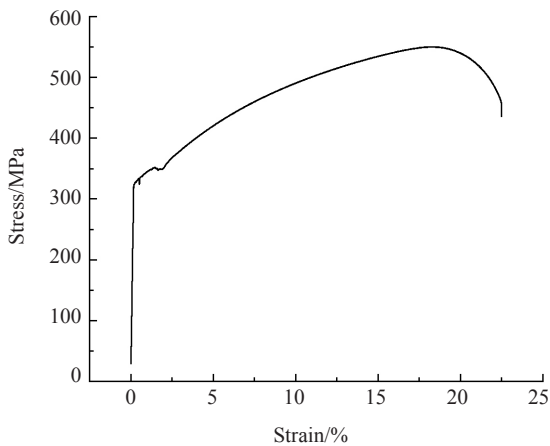


图1 20号钢拉伸试样的应力-应变曲线
Fig.1 The tensile stress-strain curve of 20 Steel specimen

由图1可见, 试样在拉伸实验中经历了弹性变形阶段、屈服阶段、塑性强化阶段、缩颈变形阶段。弹性阶段中变形为可逆的, 卸载后变形完全恢复; 屈服阶段结束后, 试样在塑性变形下产生应变, 应力不断上升; 试样在缩颈变形阶段时应力不再增加, 开始出现小裂纹, 产生缩颈变形, 最后完全断裂。

对20号钢的切样进行微观组织观察, 图2为500倍的20号钢金相组织图, 所用金相显示剂为4%硝酸酒精溶液。

从图2中可以看出, 试样的母材组织在整体上

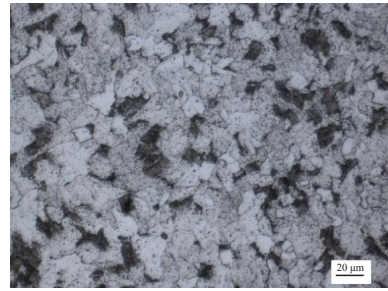


图2 20号钢母材组织(×500)
Fig.2 The microstructure of 20 Steel (×500)

细小均匀, 晶格比较明显, 由铁素体和片状珠光体组成, 在铁素体基体上分布着细小的珠光体, 且铁素体较为分散, 珠光体较为密集。

1.2 碳纤维复合材料的力学性能测试

试验采用真空辅助成型方式将碳纤维与树脂制成板材, 按照GB/T 1447—2005, 制备了3层、4层、5层、6层、8层铺层顺序均为0°的3K-T300平纹碳纤维标准试样, 拉伸试样的形状尺寸如图3所示。复合材料拉伸性能测试使用低应变速率电子万能材料试验机, 加载速率为2 mm/min, 每组4个试样, 取其平均值作为该组的实验数据。考虑到纵向为碳纤维修复层的主要受力方向, 对所制备的不同层数3K-T300平纹碳纤维试样进行纵向拉伸试验。

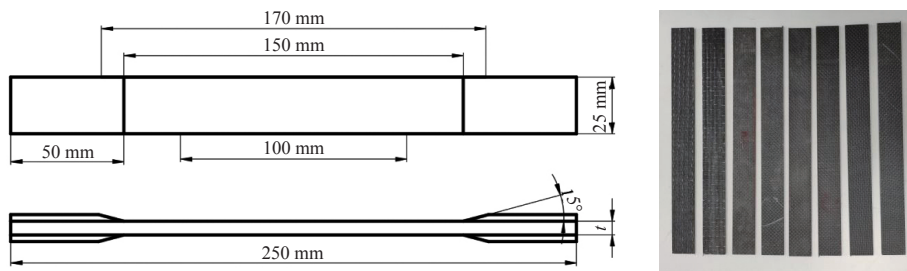


图3 拉伸试样尺寸与图片
Fig.3 The Tensile specimen size and picture

1.3 层数对T300平纹碳纤维层合板拉伸性能的影响

不同层数下的T300平纹碳纤维层合板拉伸强度试验结果如表1所示。从表1中可以得到以下结论: 随着层数的增加, 单层平纹碳纤维所承受的载荷减小, 平纹碳纤维层合板整体最大载荷逐渐增加。与3层层合板相比, 当层数增加到4层后, 最大载荷和拉伸强度各提高了43.7%、9.82%, 所以后期制备碳纤维复合材料时, 可以通过增加层数提高平纹碳纤维层

合板的强度。

不同层数下的T300平纹碳纤维层合板弹性模量、泊松比、伸长率如表2所示。随着层数的增加, 平纹碳纤维层合板的拉伸模量和泊松比稍有变动, 但基本是在均值附近上下波动。因此可以认为T300平纹碳纤维层合板的纵向拉伸模量及泊松比随层数的增加变化并不显著。

2 考虑缺陷形式的承压管道数值模拟研究

表 1 不同层数 T300 平纹碳纤维层合板纵向最大载荷及拉伸强度

Table 1 The longitudinal maximum load and tensile strength for T300 plain weave carbon fiber of different layers

层数	厚度 t / mm	实验结果	
		最大载荷 P /kN	拉伸强度 σ_0 /MPa
3 层	0.89	10.96	494.40
4 层	1.16	15.75	542.94
5 层	1.39	19.65	576.44
6 层	1.55	24.01	620.96
8 层	2.05	32.63	638.37

表 2 不同层数 T300 平纹碳纤维层合板纵向拉伸模量及泊松比

Table 2 The longitudinal tensile modulus and Poisson's ratio for T300 plain weave carbon fiber of different layers

层数	厚度 t / mm	实验结果		
		拉伸模量 E /MPa	泊松比 μ	伸长率 λ /%
3 层	0.89	35 897.75	0.045	1.0
4 层	1.16	38 515.83	0.060	1.3
5 层	1.39	41 992.16	0.056	2.2
8 层	2.05	45 994.98	0.054	2.3

2.1 缺陷管道有限元模型的建立

建立的原始管道模型如图 4 所示, 管长 500 mm, 外径 279 mm, 壁厚 8 mm。考虑到实际的工程应用情况, 将管道缺陷简化建模为均匀腐蚀或机械损伤的环形缺陷、圆形缺陷、方形缺陷^[17], 缺陷数据见表 3 所示, 位于管道中心位置, 具体缺陷几何模型如图 5 所示。本文有限元模拟中, 对局部缺陷部位网格进行细化, 在管道内壁面施加内部压力, 上下两端的横截面施加完全约束作为固定段。

管材采用 20 号钢, 具体参数选用上述实验中所获得数据, 管材的应力应变关系采用双线性随动强化模型, 其他材料属性见表 4。

2.2 网格质量敏感性分析

ANSYS 在管道缺陷处应力分析中, 其网格数量

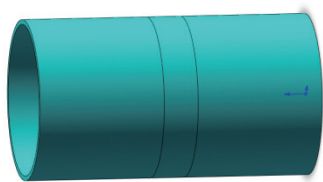


图 4 管道模型

Fig.4 The pipeline model

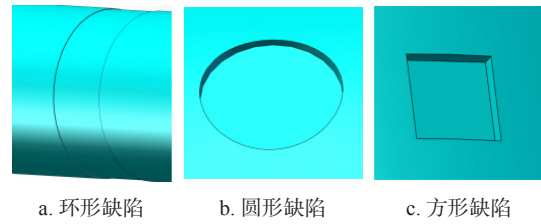


图 5 缺陷几何模型

Fig.5 The defect model

表 3 管道表面缺陷数据

Table 3 The datas of pipeline surface defect

序号	缺陷类型	减薄厚度 t / mm	缺陷减薄宽度 w /(mm) / 缺陷面积 S /(mm ²)
1	环形缺陷 1	1.5	100
2	环形缺陷 2	2.0	100
3	圆形缺陷 1	2.5	1 963
4	圆形缺陷 2	5.0	1 963
5	圆形缺陷 3	5.0	3 848
6	方形缺陷 1	2.5	625
7	方形缺陷 2	2.5	1 225
8	方形缺陷 3	2.5	2 500
9	方形缺陷 4	5.0	625
10	方形缺陷 5	5.0	1 225
11	方形缺陷 6	5.0	2 500

表 4 20 号钢材料属性

Table 4 The material properties of 20 steel

材料	密度 ρ / (g · cm ⁻³)	弹性模量 E_s /GPa	泊松 比 μ	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	切线模量 E_c /GPa
20#	7.85	210	0.3	324.5	550	6.1

可以通过输入单元尺寸进行控制, 网格数量的密集程度将影响计算结果的准确性和计算时间的长短, 但当网格数量增加到一定程度后, 计算结果逐渐趋于稳定。为确定 ANSYS 网格质量的敏感性, 对后续管道缺陷处的应力分析提供参考, 有必要对比网格数量对缺陷处最大等效应力的影响。从图 6 可以看出: 随着网格数量的增加, 三种缺陷的最大等效应力变化不大。图 7 描述了环形、圆形、方形三种不同的缺陷在内压为 8 MPa、两端面固定约束下, 各采用五种网格验证最大等效应力的计算精度。因此, 综合考虑模拟计算的精度和时间, 选择环形缺陷区的网格尺寸为 0.005 8 m, 网格数为 23 179; 圆形缺陷区的网格尺寸为 0.004 m, 网格数为 2 031; 方形缺陷区的网格尺寸为 0.005 5 m, 网格数为 25 619。

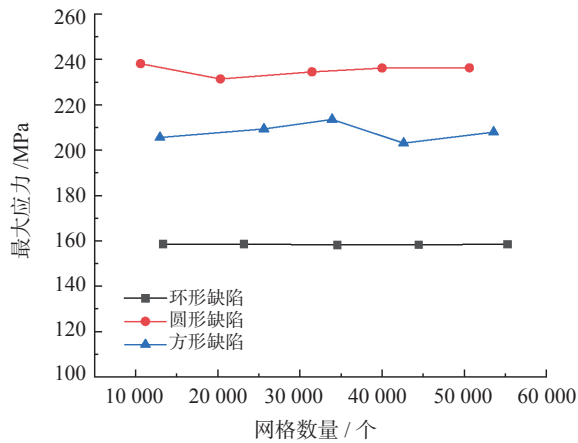


图6 最大应力和网格质量的关系

Fig.6 The relationship between maximum stress and finite element mesh quality

2.3 不同工况下缺陷管道加载模拟

在合理探究网格无关性的基础上, 本文进一步采用 ANSYS 非线性有限元分析软件对受不同内压

的管道进行应力、应变情况分析^[18]。首先对一个有深 2.5 mm、缺陷面积 625 mm² 表面方形缺陷的管道进行分析, 同时为简化计算而忽略管道的轴向变形。根据正常工况下服役管道的压强, 分别取 8 MPa、12 MPa 和 15 MPa 三种内压荷载作对比分析, 从而选出管道受损最严重时的工况作后续模拟使用。模拟结果如图 7、图 8 所示, 其中右边为不同内压下管道缺陷区的等效应力应变图。

对比不同内压工况下的等效应力应变大小及其分布情况, 可以看出管道的等效应力应变均集中分布在缺陷中心并向上下略微延伸, 为管道最危险处, 随着内压的增加, 最大等效应力应变大小及分布面积逐渐增大。在 15 MPa 工况下, 等效应变值最大, 为 0.001 7, 最大应力应变分布面积最广, 此时, 管道受到破坏, 产生了塑性变形, 表明在 15 MPa 工况下管道容易产生损伤的区域及损伤速度比其他两个工况更多更快, 即 15 MPa 工况对管道产生的破坏更严重,

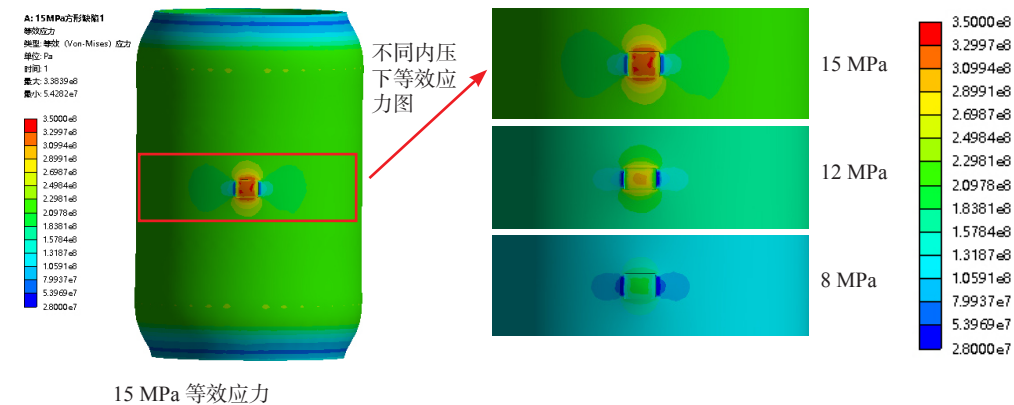


图7 不同内压下缺陷管道等效应力图

Fig.7 The equivalent stress of defective pipes at different internal pressures

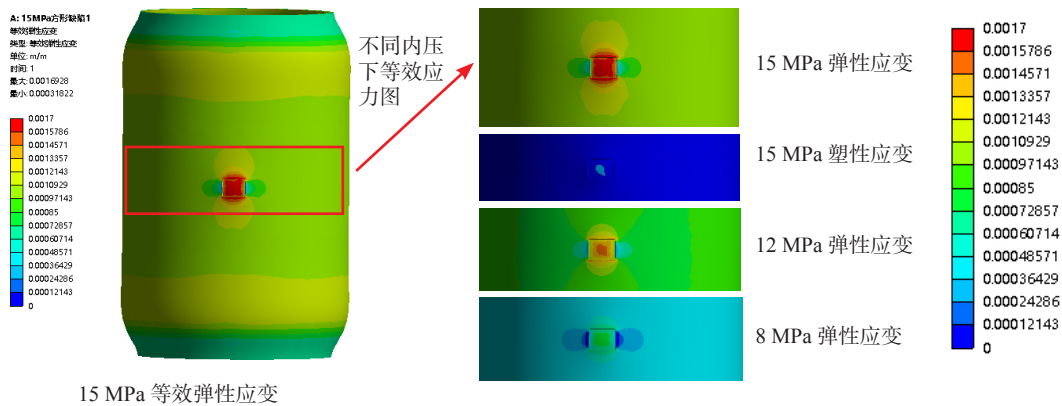


图8 不同内压下缺陷管道等效应变图

Fig.8 The equivalent strain of defective pipes at different internal pressures

因此将内压为 15 MPa 作为后续模拟所用工况。

2.4 不同缺陷形式管道的加载模拟

为了研究管道在不同缺陷情况下的应力应变变化, 本文选取环形、圆形、方形三种不同的缺陷形式, 其载荷条件及约束如上文所述, 对模型进行 Mises 应力和弹塑性应变的分析, 获得相应模拟结果如图 9、图 10、图 11、表 5、表 6、表 7 所示。

对比三种不同缺陷情况下的模拟结果可以看出, 对于相同的缺陷形式, 当减薄厚度较小时, 等效应力应变随缺陷面积增加变化较小, 然而当减薄厚度较大

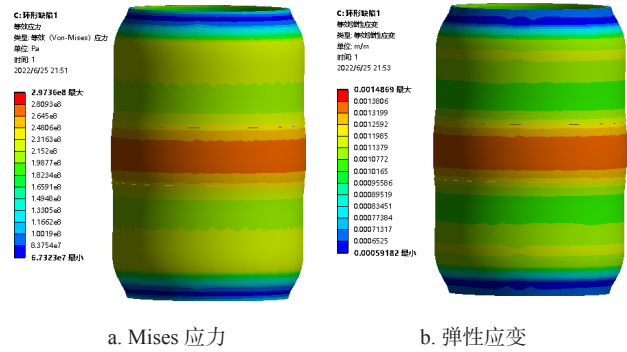


图 9 环形缺陷 1 应力应变图
Fig.9 Stress-strain for pipeline with loop defect 1

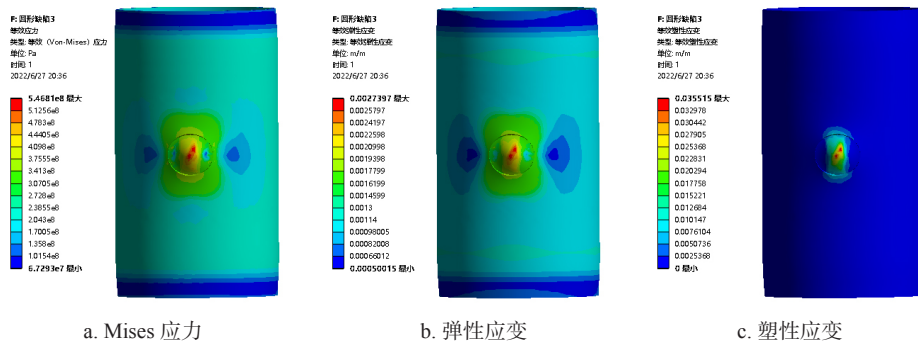


图 10 圆形缺陷 3 应力应变图
Fig.10 Stress-strain for circular defect 3

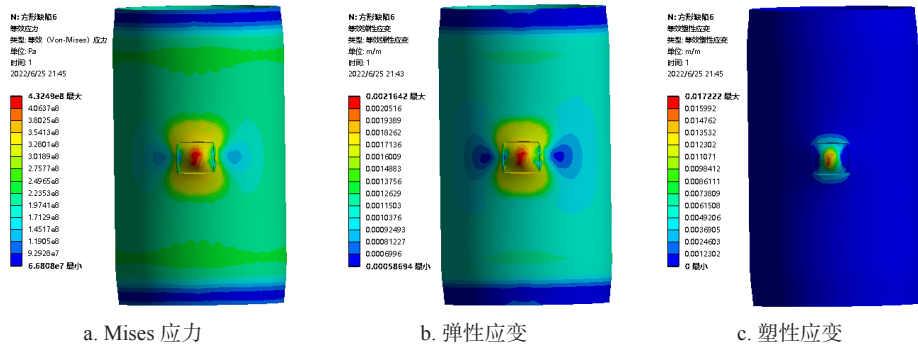


图 11 方形缺陷 6 应力应变图
Fig.11 Stress-strain for quadrate defect 6

表 5 环形缺陷管道模拟结果 Table 5 The simulation results for pipeline with loop defect				
序号	减薄厚度 t/mm	缺陷减薄宽度 w/mm	最大等效应力 σ/MPa	最大弹性应变 $\epsilon_e / (\text{m/m})$
1	1.5	100	297.36	0.001 486 9
2	2.0	100	325.36	0.001 627 4

表 6 圆形缺陷管道模拟结果 Table 6 The simulation results for pipeline of circular defect					
序号	减薄厚度 t/mm	缺陷面积 S/mm^2	最大等效应力 σ/MPa	最大弹性应变 $\epsilon_e / (\text{m/m})$	最大塑性应变 $\epsilon_p / (\text{m/m})$
1	2.5	1 963	335.32	0.001 677 6	0.001 585 2
2	5.0	1 963	388.62	0.002 010 9	0.009 797 6
3	5.0	3 848	546.81	0.002 739 7	0.035 150

表7 方形缺陷管道模拟结果

Table 7 The simulation results for pipeline of quadrate defect

序号	减薄厚度 t/mm	缺陷面积 S/mm^2	最大弹性应变 $\varepsilon_e/(\text{m/m})$	最大等效应力 σ/MPa	最大塑性应变 $\varepsilon_p/(\text{m/m})$
1	2.5	625	0.001 692 8	338.39	0
2	2.5	1 225	0.001 693 2	338.24	0.000 595 25
3	2.5	2 500	0.001 682 9	336.19	0.001 329 20
4	5.0	625	0.001 713 3	342.11	0.002 886 40
5	5.0	1 225	0.001 854 8	370.41	0.007 384 90
6	5.0	2 500	0.002 164 2	432.49	0.017 222 00

时,随着缺陷面积的增加,最大应力、应变明显增大。因此,相较于缺陷面积,减薄厚度在缺陷中对管道应力状态的影响更大,仅当减薄厚度较大时,才表现出缺陷面积对管道应力、应变的影响。

值得注意的是,不同缺陷所造成的应力、应变现象有所差异。环形缺陷的等效应力、应变主要集中在缺陷中部,圆形、方形缺陷的等效应力应变集中在缺陷中心并向上下两端扩展,最大应力应变分布面积远小于环形缺陷,存在更为明显的应力集中现象。由于缺陷形状的原因,在相同载荷下,圆形、方形缺陷中心容易产生大于环形缺陷的应力和变形,管道在缺陷影响下存在显著的塑性应变,并主要分布在缺陷中心及周围。对比各分析结果证明,缺陷中心处最容易产生塑性变形,此处为缺陷最危险处。对比破坏形式,圆形缺陷和方形缺陷由于在管道表面,因此在无法承受工作内压的情况下会率先从缺陷中心处产生破坏点,进而影响缺陷周围其他区域,扩大变形区域,加重对管道的破坏。同时,圆形缺陷和方形缺陷也使管道产生了塑性变形,改变了管道的结构,加速了管道破坏。而环形缺陷由于围绕在管道圆周,改变了管道表面的应力分布状态,主要集中在环形缺陷中间部分且范围较大,在相同载荷下对管道安全的影响较小。

3 不同缺陷管道的碳纤维复合材料补强分析

3.1 碳纤维补强后管道有限元模型的建立

针对上述三类含缺陷管道,并考虑实际修复工艺,本研究首先用填缝剂将缺陷填平,再采用环氧树脂增强的 T300 平纹碳纤维对其进行缠绕补强。将缺陷位置置于补强层中间,补强层中心与缺陷中心重合保证补强效果。补强层包覆在管道上,所取模型结构与原始管道一致,仅尺寸略有不同。补强后的管道模型主要包括原始缺陷管道、填缝剂部分、补强层部分,

如图 12 所示。采用整体建模的方式,在 ANSYS 非线性有限元分析软件分别对管道、填缝剂部分、补强层部位赋予材料属性,具体参数选用上述实验中所得数据,环氧树脂增强的 T300 平纹碳纤维的材料属性如表 8 所示,同时定义填缝剂的弹性模量为 1.74 GPa,泊松比为 0.45。

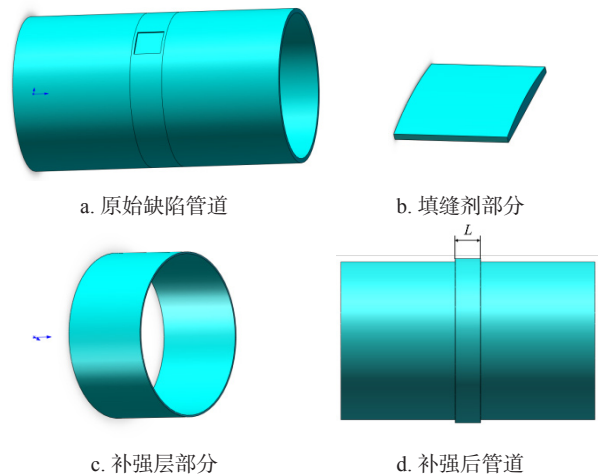


图 12 补强后管道模型

Fig.12 The pipeline model after reinforcement

表 8 环氧树脂增强的 T300 平纹碳纤维材料属性
Table 8 The material property of T300 plain carbon fiber reinforced with epoxy resin

名称	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	单层厚度 t/mm	杨氏模量 E_c/MPa	泊松比 μ
T300 平纹碳纤维	0.54	0.37	40 600.18	0.054

3.2 不同缺陷管道补强分析

管道根据缺陷类型、大小、形状及 T300 碳纤维平纹编织布的宽度进行修复方法的综合考虑,最低补强长度参考 ASME PCC 2—2011《Repair of Pressure Equipment and Piping》规范^[19],补强层的最低补强长度计算公式为:

$$L = 2L_{\text{over}} + L_{\text{defect}} + 2L_{\text{raper}} \quad (1)$$

$$L_{\text{over}} = 2\sqrt{Dt} \quad (2)$$

式中 L ——补强层的总补强长度（如图 12 所示），mm；

L_{over} ——补强层与原始管道完整段的重叠长度，mm；

L_{defect} ——管道的缺陷轴向长度，mm；

L_{raper} ——补强层末端的削边长度，最小锥度为 5 : 1，mm；

t ——原始管道壁厚，mm；

D ——原始管道外径，mm。

参照上述计算公式确定补强层的最低补强长度后，根据本文工作中模拟的缺陷情况，采用相应的方案进行修复并分析其补强效果^[20]，修复方案如表 9 所示。

表 9 T300 碳纤维修复方案
Table 9 The repair plan of T300

序号	缺陷类型	减薄厚度 t/mm	缺陷减薄宽度 $w/(\text{mm})$ / 缺陷面积 $S/(\text{mm}^2)$	修复长度 L/mm	材料层数
1	环形缺陷 2	2.0	100	200/220/240/260/280	4
2	环形缺陷 2	2.0	100	200	3/4/5/6/8
3	圆形缺陷 2	5.0	1 963	260/280/300/320/340	4
4	圆形缺陷 2	5.0	1 963	260	3/4/5/6/8
5	方形缺陷 2	2.5	1 225	140/160/180/200/220	4
6	方形缺陷 2	2.5	1 225	140	3/4/5/6/8
7	方形缺陷 5	5.0	1 225	140/160/180/200/220	4
8	方形缺陷 5	5.0	1 225	140	3/4/5/6/8
9	方形缺陷 6	5.0	2 500	150/170/190/210/230	4
10	方形缺陷 6	5.0	2 500	150	3/4/5/6/8

在含缺陷管道模型基础上对不同缺陷情况进行补强修复模拟，其载荷条件及约束不变，模拟分析不同形状缺陷在 15 MPa 内压下的应力应变状态。

首先，对减薄厚度 2 mm 的环形缺陷管道进行修复补强分析，将缺陷用填缝剂填平并包裹碳纤维复合材料，修复管道的等效应力应变状况如图 13 所示。可以看出，修复后管道缺陷处的应力状态明显低于上下两端，应力分布更加均匀，在修复层边缘应力过渡明显。同时，管道修复区的最大等效应变为 0.001 613 1，均较未修复管道有所下降。

图 14 为采用碳纤维复合材料对圆形缺陷管道进行补强修复的结果图。明显看出，管道在加固 8 层碳纤维布后，除了缺陷处局部应力集中外，其他部位的应力值均低于 266.47 MPa，小于管道的屈服强度。补强后，圆形缺陷管道应力集中部位局部屈服，应力重新分布，一定程度上减小最大等效应力、周边应力和应变，同时使最大等效应力应变分布面积较未修复时有所减小。

对不同深度、不同面积的方形缺陷管道，修复后的管道表面缺陷处最大等效应力应变均有所降低，

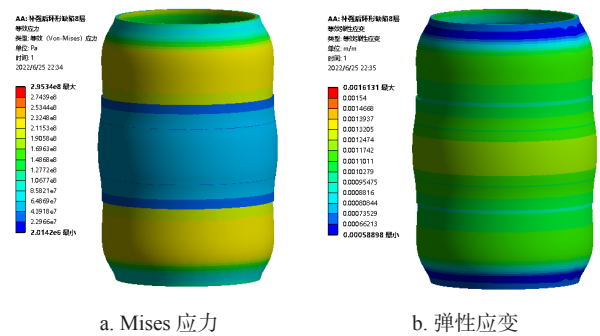


图 13 复合材料补强后环形缺陷应力应变图

Fig.13 Stress-strain for loop defect repaired by composite reinforcement

下降幅度因缺陷的不同情况而异，深度越深、面积越大，最大等效应力应变变化的幅度越大。修复后的最大等效应力分布面积从原来的缺陷中心及其上下两端延伸处缩小至方形缺陷中心，且方形缺陷周边应力也有一定程度减小，应力分布更加均匀。表明通过碳纤维复合材料修复补强能够有效减小管道受方形缺陷影响而产生的应力、应变，同时能够优化应力、应变分布，避免产生应力集中的现象。图 15 为方形缺陷修复补强后的应力、应变云图。

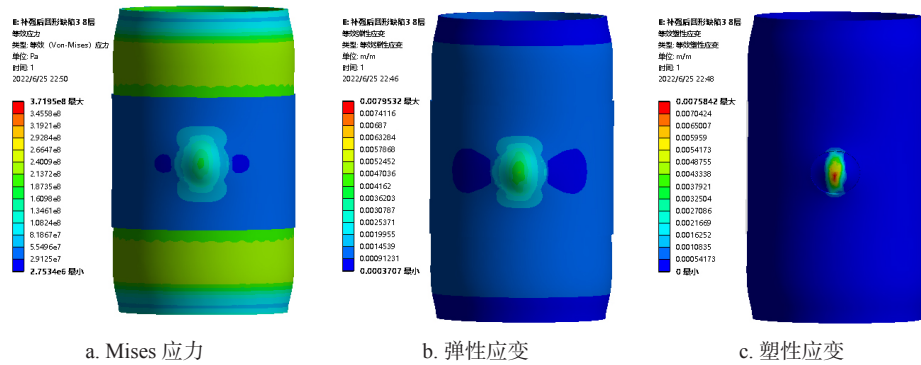


图 14 复合材料补强后圆形缺陷应力应变图

Fig 14 Stress-strain for circular defect repaired by composite reinforcement

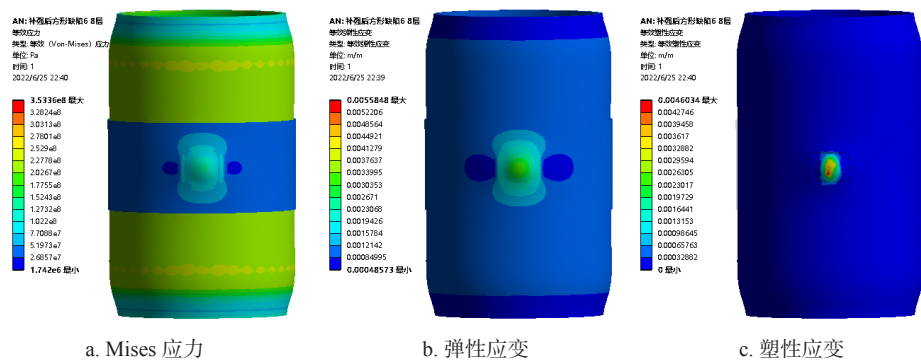


图 15 复合材料补强后方形缺陷应力应变图

Fig.15 Stress-strain for quadrate defect repaired by composite reinforcement

3.3 修复尺寸对补强效果的影响

图 16 和图 17 示出了不同形状、深度、面积缺陷修复长度与最大等效应力、应变的关系曲线。可以看出, 修复长度和最大等效应力、应变呈趋于水平的线性关系。缺陷形状、面积、深度的改变对缺陷修复区的应力、应变状态影响较大, 且缺陷形状趋于圆形、

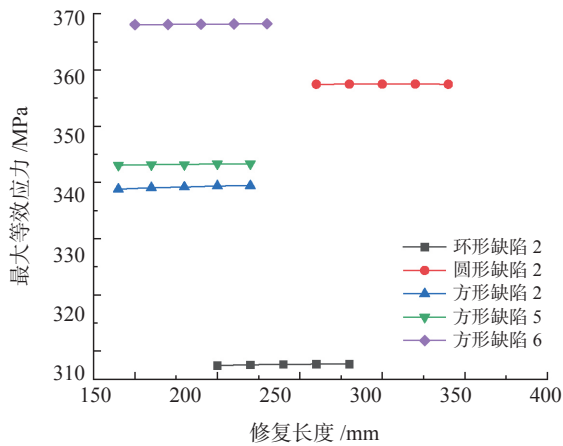


图 16 管道修复长度与缺陷处最大等效应力的关系

Fig.16 The relationship between the repaired length of pipeline and the maximum equivalent stress of the defect

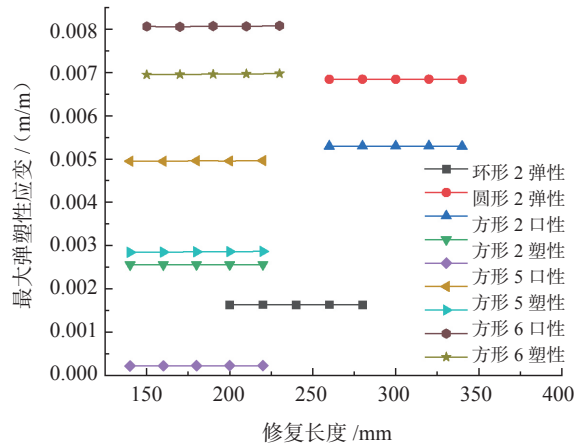


图 17 管道修复长度与缺陷处最大弹塑性应变的关系

Fig.17 The relationship between the repaired length of pipeline and the maximum elastic-plastic strain of the defect

方形, 缺陷深度越深、面积越大, 缺陷修复区的应力应变越大。随着修复长度的增加, 缺陷修复区最大等效应力、应变变化不大, 即在修复长度满足要求后, 继续增加修复长度并不能有效减小管道缺陷处的等效应力、应变, 达到更好的修复效果。

图 18 和图 19 为不同缺陷形状、深度、面积对

应的缺陷处最大等效应力、应变与修复层数的关系曲线。可以看出，与修复长度的变化相比，修复层数的变化对缺陷修复区的等效应力应变影响大很多。随着修复层数的增加，管道缺陷修复区的等效应力、应变逐渐降低，且深度越深、面积越大的圆形、方形缺陷降低效果越明显，例如与方形缺陷 5 相比，方形缺陷 6 的最大等效应力随层数增加多下降 2.59%，最大等效塑性应变多下降 1.38%。特别地，环形缺陷修复区的修复层数和最大等效应力呈线性关系，即在弹性变形阶段，每增加一层碳纤维复合材料，管道缺陷处的最大等效应力减少一定值。

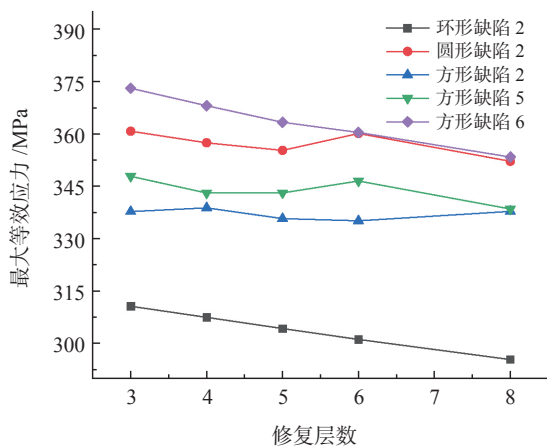


图 18 管道修复层数与缺陷处最大等效应力的关系

Fig.18 The relationship between the repaired layers of pipeline and the maximum equivalent stress of the defect

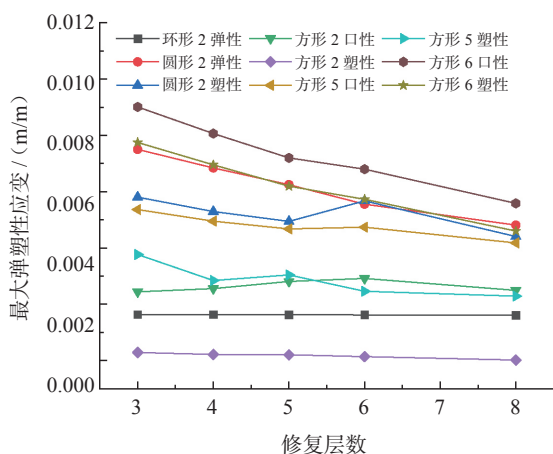


图 19 管道修复层数与缺陷处最大弹塑性应变的关系

Fig.19 The relationship between the repaired layers of pipeline and the maximum elastic-plastic strain of the defect

从多种缺陷管道补强模拟结果表明管道缺陷处的应力、应变分布在修复后从一定程度上得到改善，减轻了管道因缺陷而导致的形变和破裂，达到修复管

道的目的，且缺陷深度越深、面积越大，补强效果越好，圆形、方形缺陷的补强效果优于环形缺陷。在修复长度达到必须修复值后，其变化对缺陷处应力状态的影响较小，而碳纤维材料修复层数对管道缺陷修复区影响较大，修复层数越多，缺陷处的等效应力、应变越低，可以通过适当增加修复层数提升补强效果。

4 结论

本文在合理探究管材与碳纤维复合材料力学性能的基础上，建立了有 / 无碳纤维补强的缺陷管道模型，分析了缺陷形状、缺陷尺寸、修复层数、修复长度对于碳纤维补强缺陷管道的影响，相关结论如下：

(1) 对于不同层数的平纹 T300-3K 碳纤维层合板，随层数的增加，层合板整体最大载荷逐渐增加，而其他材料参数随着层数的增加并未有明显变化。

(2) 考虑不同缺陷形状对应力集中的影响，分析了不同缺陷形状、缺陷减薄厚度、缺陷减薄面积对管道应力应变影响的基础上，进一步探究了对管道安全影响的最大因素。相比于环形缺陷，圆形、方形缺陷管道的修复效果较好，且缺陷深度越深、面积越大，修复效果越明显。当碳纤维层修复长度达到所需值之后，继续增加长度对修复效果影响不大，根据缺陷尺寸采用较厚碳纤维层的修复效果较好，可以适当增加修复层数来提高补强效果。

(3) 碳纤维复合材料补强技术能在一定程度上减小管道缺陷处的应力、应变。通过碳纤维复合材料修复能优化含缺陷管道的应力、应变分布，使其更加均匀，有效地减少管道内应力集中的现象和管道表面缺陷处的弹塑性变形速率，达到修复管道的目的。通过对不同缺陷管道的数值模拟，可以提高碳纤维修复补强技术在实际工况中的有效性和适用性，提出合理的碳纤维修复的安全评价准则。

参考文献

[1] 姚森, 张楨, 温俊阳, 等. 国内油气管道外检测技术应用探讨[J]. 石油和化工设备, 2019, 22 (10): 88-90.

[2] 胡小梅, 王汝恒, 贾彬, 等. 碳纤维布补强压力管道试验研究及有限元分析[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41 (2): 91-95.

[3] 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.

- [4] 唐晓渭. 碳纤维复合材料在长输原油管道维修补强中的应用[D]. 西安: 西安石油大学, 2014.
- [5] Smith JLS, Dowden BW. Pipe repair clamp: U. S. Patent 6, 305, 719[P]. 2001-10-23.
- [6] 吴佳琦. 压力管道缺陷的碳纤维复合材料修复补强技术研究[D]. 上海: 上海: 华东理工大学, 2014.
- [7] 宋文, 刘艳东, 刘刚. 国内外管道修复技术的发展及应用[J]. 中国高新技术企业, 2009, 16(18): 41-42.
- [8] Alexander C, Francini B. State of the art assessment of composite systems used to repair transmission pipelines[R]. IPC 2006-10484, 2006.
- [9] 马卫锋, 唐凡, 梁兵. 管道修复补强用复合材料现场检测及评价指标体系[J]. 石油工程建设, 2013, 39(6): 56-59.
- [10] 李长青, 任攀, 周雷. 复合材料修复技术概述[J]. 机械工程师, 2015, 47(10): 151-152.
- [11] 李娜娜. 腐蚀管道复合材料补强修复技术应用浅析[J]. 化学工程与装备, 2017, 46(12): 227-230.
- [12] SHOUMAN A, FARID T. Compressive strain limits of composite repair pipelines under combined loading states[J]. Composite Structures, 2011, 93(5): 1538-1548.
- [13] 孟祥进, 吴佳琦, 施哲雄, 等. 碳纤维修复技术在局部减薄缺陷管道中的应用研究[J]. 现代化工, 2015, 35(8): 144-146.
- [14] 李宝荣, 张建昌, 许忠伟, 等. 碳纤维修复管道的水压试验以及模拟验证[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(4): 19-20.
- [15] 欧阳赛赛, 张玉, 钟超伟. 复合材料修复管道的强度试验研究[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(9): 36-40.
- [16] Hmidan A, Kim Y J, Yazdani S. Crack-dependent response of steel elements strengthened with CFRP sheets[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 110-120.
- [17] 施奇林, 段梦兰, 钟朝伟, 等. 复合材料缠绕修复腐蚀管道的有限元模型研究[J]. 石油机械, 2017, 45(9): 110-116.
- [18] 颜力, 蒙东英, 余乐, 等. 基于有限元分析的复合修复技术及其应用[J]. 内蒙古石油化工, 2011, 37(10): 162-166.
- [19] ASME PCC-2 Repair of Pressure Equipment and Piping[S]. The American Society of Mechanical Engineers, 2011.
- [20] 惠文颖, 牛健壮. 复合材料修复管体缺陷的影响因素[J]. 油气储运, 2017, 36(7): 805-809.

The Study on Numerical Simulation of Defective Pipe Reinforced with Carbon Fiber Composite Materials

Zhou Yun, Wang Qi, Wang Yining

(Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210036, China)

Abstract: Nowadays oil, natural gas and other energy sources are mainly transported by pipeline, the pipeline will produce various defects in long-term use, and these defects will have an affect on the structure and strength of the pipeline. The current advanced pipeline repair technology is composite reinforcement technology, of which carbon fiber reinforced plastic (CFRP) are the better choice. In order to test the effect of reinforcing the pipe defects with/without carbon fiber, the tensile experimental study of CFRP with different number of layers was carried out. Combined with ANSYS numerical simulation, the stress and strain distribution of different defective pipelines in bearing before and after repair were investigated, and the influencing factors of the repair and reinforcement effect were analyzed. The results show that: the thickness of defect thinning has a greater affect on the stress and strain state of the pipe, CFRP technology can optimize the stress and strain distribution of the pipe defects while reducing the stress and strain, and the repair effect can be improved by increasing the number of carbon fiber repair layers, and the relevant research has a certain guiding significance for the repair of the pipeline reinforcement.

Keywords: pressure pipeline; localized defect; composite material; carbon fiber reinforcement; numerical simulation