doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.06.004

设计计算

内压作用下多重增强钢塑复合管力学性能分析

胡名震[1,2,3],吕　杰[1,2],袁　蓓[4],刘文俊[4],师　俊[1,2,3]

(1.武汉工程大学 机电工程学院,武汉 430205;2.武汉工程大学 化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室,武汉 430205;3.武汉工程大学 湖北省绿色化工装备工程技术研究中心,武汉 430205;4.湖北兴欣科技股份有限公司,湖北鄂州 436000)

摘　要:针对多重增强钢塑复合管(MRSPCP)短时内压承载能力的预测方法开展研究。通过单轴拉伸试验获取各部件材料属性,其中,钢丝因编织工艺导致变形而无法直接得出其应力-应变关系,采用反演计算确定等效力学参量;对DN315型号MRSPCP开展短时爆破试验,以评估其力学性能,平均爆破压力为3.83 MPa,同时根据失效试样破坏特征将钢丝网断裂总结为失效判据;创建MRSPCP有限元分析模型,模拟得到钢丝网失效时的爆破失效压力为3.66 MPa。结果表明,有限元结果与试验结果的相对误差仅为-4.44%,表明有限元模型正确有效,钢丝网断裂失效判据合理。进一步基于有限元模型,分析了钢丝直径、管壁厚度、钢丝缠绕角度改变时,管材内压承载能力的变化趋势,为MRSPCP设计方法的提出与结构的优化提供了理论基础。

关键词:多重增强钢塑复合管;反演计算;爆破试验;有限元模型;失效分析

中图分类号:TH49;TB331;TG496　　**文献标志码:**A

Analysis of mechanical properties of multi-reinforced steel-plastic composite pipe under internal pressure

HU Mingzhen[1,2,3],LYU Jie[1,2],YUAN Bei[4],LIU Wenjun[4],SHI Jun[1,2,3]

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering,Wuhan University of Engineering,Wuhan 430205,China;2.Key Laboratory of Chemical Equipment Strengthening and Intrinsic Safety,Wuhan University of Engineering,Wuhan 430205,China;3.Hubei Green Chemical Equipment Engineering Technology Research Center,Wuhan University of Engineering,Wuhan 430205,China;4.Hubei Xingxin Technology Co.,Ltd.,Ezhou 436000,China)

Abstract: This study focuses on the research of prediction methods for the short-term internal pressure-bearing capacity of multi-reinforced steel-plastic composite pipes (MRSPCP). First, the material properties of each component are obtained through uniaxial tensile tests. Due to deformation induced by the weaving process, the stress-strain relationship of the steel wires cannot be directly derived; instead, equivalent mechanical parameters are determined via inversion calculation. Subsequently, short-term burst tests are conducted on DN315 MRSPCP to evaluate its mechanical performance, with an average burst pressure of 3.83 MPa. Meanwhile, based on the failure characteristics of the failed specimens, the fracture of the steel wire mesh is summarized as the failure criterion. A finite element analysis (FEA) model of MRSPCP is established, and the simulated burst failure pressure when the steel wire mesh fails is 3.66 MPa. The results show that the relative error between the finite element results and the test results is only -4.44%, which verifies the correctness and effectiveness of the finite element model, as well as the rationality of the steel wire mesh fracture failure criterion. Further, based on the finite element model, the variation trends of the pipe's internal pressure-bearing capacity are analyzed under changes in steel wire diameter, pipe wall thickness, and steel wire winding angle. This provides a theoretical foundation for formulating the design method and optimizing the structure of MRSPCP.

Key words: multiple-reinforced steel-plastic composite pipe; inverse identification; bursting test; finite element model; failure analysis

收稿日期:2025-03-28　**修回日期:**2025-05-24

基金项目:国家市场监管重点实验室(特种设备安全与节能)开放基金项目(SYS-TZSBAQYJJ-2024-003)

0 引言

管道运输作为继公路、铁路、空运、海运之外的世界第五大运输体系，既可以有效避免气候、地质灾害、交通干扰等外界不利因素的影响，又能根据市场需求自行调控，更加可靠、安全、环保和节能[1-4]。随着经济发展与城市建设，管道行业的发展对我国基础工业、能源结构、生态环境等方面产生了积极而深远的影响[5-8]。传统单一材质管道具有较大局限性，例如金属管道强度高但易腐蚀且过于笨重；塑料管道耐腐蚀性强但结构强度不足。复合管则可以综合多种材料的优势，满足不同介质的输运需求。

近年来，我国研发的多重增强钢塑复合管（以下简称MRSPCP）突破了传统单一材质管道的局限性。如图1、图2所示，MRSPCP以钢带、钢丝网及其组合结构为增强体，通过挤出工艺用粘接树脂将聚乙烯与增强体连续复合成带材（带材中钢带呈立式结构，钢网包裹在带材中起加强作用），再使带材采用熔融热粘接工艺，以螺旋缠绕方式热压合成复合管（参见T/CPPIA 42—2024《低压排水用多重增强钢塑复合管及连接件》）。



图1 多重增强复合管实物

Fig.1 Multi-reinforced steel-plastic composite pipe physical diagram

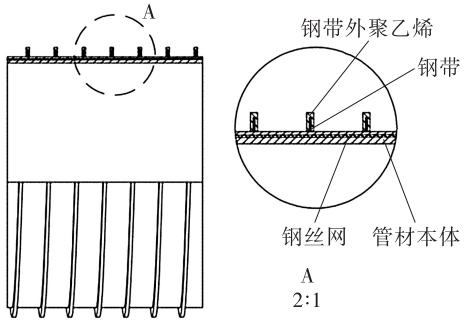


图2 多重增强钢塑复合管的结构示意

Fig.2 Structure diagram of multi-reinforced steel-plastic composite pipe

MRSPCP特殊的结构集合钢、塑两种材料的优点，形成兼具阻氧、防腐及抗压能力强的新型大口径管道，优越的综合性能使其广泛应用于供水排水、排污工程、跨海淡水输送工程等领域[9]。其特殊结构使其在抗外压上有明显优势，但作为给排水产品，对承受内压的性能同样有极高要求，故亟需开展内压作用下的MRSPCP力学性能分析工作。但MRSPCP力学性能与结构设计方法研究鲜有报道。

近年来，国内外学者对多类复合管的力学性能进行了研究，这些工作均为MRSPCP力学性能研究提供参考。ZHENG等[10-11]通过基于经典层合板理论创建模型，研究了聚乙烯钢丝缠绕增强复合管在不同温度下短时爆破压力的变化，并揭示HDPE粘弹性对层间载荷分布的影响。BAI等[12-15]对金属带柔性增强管（MSFP）在各种复杂工况下的力学性能和失效判据进行了研究，为MSFP的结构优化提供了理论支撑。伍金奎等[16-17]对钢丝缠绕增强聚乙烯复合管在高温高压工况下的性能进行研究，又进一步设计了承载能力更高的四层钢丝缠绕增强结构，并进行了长期静液压测试和爆破压力测试，以验证其性能。徐广丽等[18]对钢丝缠绕复合管进行水压爆破对比试验，发现服役后管材平均瞬时爆破压力与新管相比有所降低，膨胀变形显著增大。推测这与施工过程中粘结剂局部失效及聚乙烯基体老化导致的层间协同作用弱化密切相关。高茂鑫[19]建立了钢带缠绕复合管（SSRTP）数值计算模型，分析其在内外压及拉伸载荷组合作用下的扭转变形与承载性能，为SSRTP的设计制造及安全评价提供了理论依据。张吉祥[20]对内压作用下纤维增强柔性复合管的力学性能进行了研究。基于三维各向异性弹性力学建立理论模型，结合有限元模型进行分析，得到管道在爆破压力下的承载性能，并讨论内压、径厚比、增强层缠绕角度和层数对承载力的影响。PATNAIK等[21-22]对碳纤维增强复合管的抗爆能力进行研究和设计优化，并结合Hashin损伤模型与Johnson-Cook本构方程，对失效机制进行分析。DJERRAD等[23-25]对芳纶纤维增强复合管（AFRP）在轴向冲击载荷下的耐撞性能进行研究，成功预测了AFRP失效模式与载荷响应，考虑AFRP层厚度、钢管厚度及冲击速度等参数对管道力学性能的影响。SEBEAY等[26]基于三维各向异性弹性力学理论和Hashin损伤准

则建立有限元模型，研究了玻璃纤维增强管在静水内压下的力学性能与失效机制，并分析缠绕角度、壁厚、径厚比对管道性能的影响。

综上所述，当前阶段对于复合管的研究主要集中于单一增强体复合管，故本文对MRSPC力学性能的研究具有一定创新性与应用价值。主要研究内容如下：首先，通过单轴拉伸试验获取MRSPCP各部件性能参数，其中，钢丝为波纹形，无法通过试验直接获取真实的应力-应变关系，故将波纹形钢丝根据等体积原则简化为直线形钢丝，利用反演计算方法获取钢丝的等效材料参数；其次，进行短时爆破试验对管道性能进行评估，根据失效管道试样破口、内部结构件的观察，对管材失效判据进行分析，爆破试验数据及其试样观测结果都为后续仿真结果提供验证依据；然后，根据试验工况建立MRSPCP有限元模型，得到管材爆破压力，将爆破压力计算值与试验值进行对比，验证模型有效性，对管材各部件的承载比例进行计算，讨论整个过程中各部件的承载情况；最后，通过有限元软件创建不同钢丝直径、管壁厚度、钢丝缠绕角度的MRSPCP模型，讨论其对MRSPCP性能的影响。研究工作可为MRSPCP及相似结构复合管的设计方法与结构优化提供理论基础。

1 试验研究

1.1 单轴拉伸试验

在钢丝拉伸试验中，首先，切割制备一定大小的白色塑料片并进行喷涂，形成清晰均匀的黑色斑点；然后，用热熔胶将两块涂漆后的塑料片粘合在钢丝试样的两端；最后，使用2D数字图像相关系统（VIC2D，由Correlated Solutions Inc.提供）监测拉伸过程并提取应变数据。设置试验机的加载速率为1 mm/min，图像采集频率为每张图表2 s。将钢丝试样的断裂作为终止测试的标准，并对采集的数据进行提取和排列。

在进行钢带的拉伸试验时，先对试样进行抛光处理并用细砂纸处理试样表面的杂质。因为钢带试样具有一定的宽度，所以直接对试样进行喷涂，形成均匀的散斑。处理完样品后进行上文中相同的步骤，得出相应的应力-应变曲线。

1.1.1 HDPE与钢带

将单轴拉伸试验获得的数据进行处理，得到真实的应力-应变曲线。图3和图4分别示出HDPE和钢带的应力-应变曲线，二者均表现出显著的非线性力学行为。为降低后续计算成本，将HDPE曲线简化为双线性弹塑性模型。

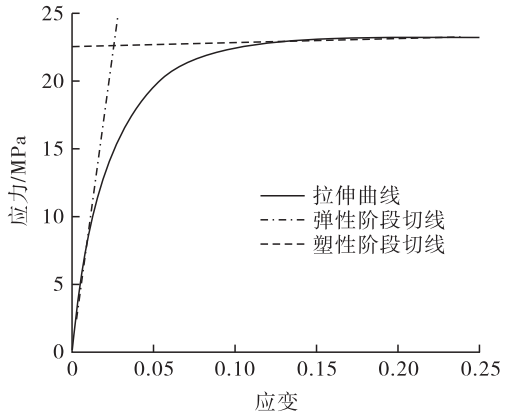


图3 HDPE应力-应变曲线

Fig.3 HDPE stress-strain curve

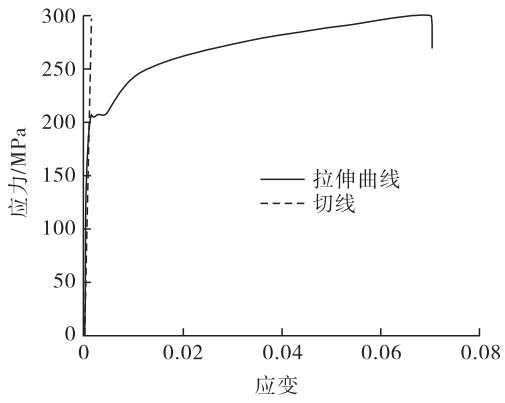


图4 钢带应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of steel strip

如图3所示，在HDPE的弹性阶段和塑性阶段的拉伸曲线处进行切向拟合，得到HDPE的杨氏模量与屈服点。而钢带有着明显的屈服点和断裂破坏点，可以直观地从应力-应变曲线上获得其屈服应力和极限抗拉强度。如图4所示，在钢带的弹性阶段绘制切线，其中，切线的斜率为钢带的杨氏模量。表1列出HDPE与钢带的材料参数。

表1 HDPE与钢带的材料参数

Tab.1 Material parameters of HDPE and steel strip

部件	杨氏模量E/MPa	泊松比μ	屈服应力σ/MPa	极限拉伸强度σ_U/MPa
HDPE	885.58	0.45	22.61	—
钢带	210 000	0.24	253.04	300.8

1.1.2 钢丝简化与反演计算

在实际生产时，钢丝网的编织工艺使钢丝被制造成凹凸的波纹形曲线，如图5所示。在拉伸过程中弯曲的钢丝被拉直，使得单轴拉伸试验中真实的材料应变难以获取。为了获得钢丝有效的应力–应变关系，需要对钢丝部分进行简化。

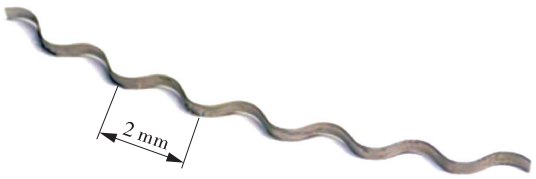


图5 波浪形钢丝

Fig.5 Wave-shaped steel wire

简化前后的钢丝需要保证首末两端的直线距离和钢丝体积均不发生变化。由下式计算出简化后的直线钢丝半径：

$$\pi r^2 L_0 = \pi r_{st}^2 L_{st} \tag{1}$$

式中，r为弯曲钢丝的半径，mm；L_0为弯曲钢丝首末两端的直线距离，mm；r_{st}为直线钢丝的半径，mm；L_{st}为直线钢丝首末两端的直线距离，mm。

经测量，弯曲钢丝的半径r=0.2 mm，每一个周期的钢丝段长度为2 mm，波峰和波谷均为0.2 mm。截取10个周期结构进行简化计算，弯曲钢丝与直线钢丝首末两端的直线距离L_0=L_{st}=25 mm，比弯曲钢丝的实际长度短。计算出简化后的直线钢丝半径r_{st}=0.205 mm。但简化后直线钢丝的弹性模量、屈服强度、极限拉伸强度仍然未知，借助Abaqus对直线钢丝进行反演计算。先预设钢丝的材料参数，得到模拟后的力–位移曲线，再不断调整参数使模拟得出的力–位移曲线与拉伸试验所得到的曲线一致。

当模拟曲线与试验曲线一致时，ABAQUS模型中设置的材料参数可以代表钢丝的力学性能。钢丝的力–位移曲线如图6所示，拉伸试验所得应力–应变曲线如图7所示。表2列出钢丝的材料参数。

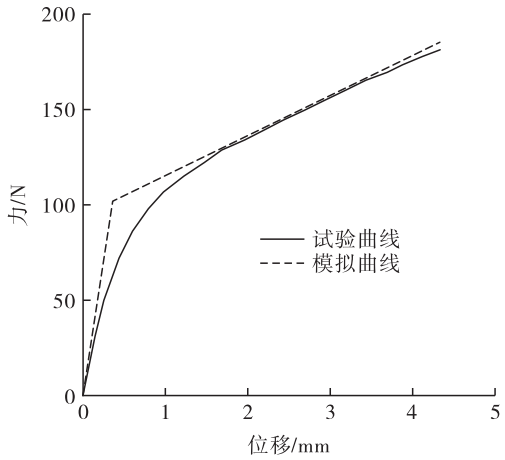


图6 钢丝力–位移曲线

Fig.6 Steel wire force–displacement curve

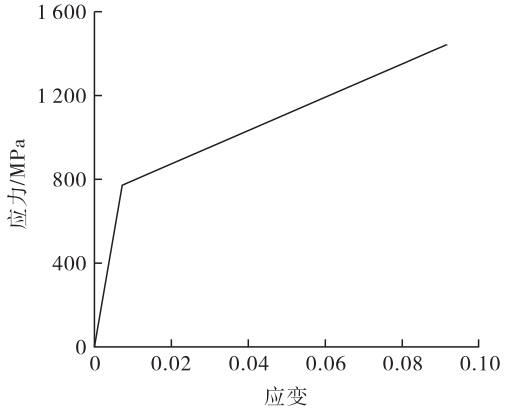


图7 钢丝应力–应变曲线

Fig.7 Stress–strain curve of steel wire

表2 钢丝的材料参数

Tab.2 Material parameters of steel wire

参数	弹性模量E_{st}/MPa	泊松比μ_{st}	屈服应力σ_{st}/MPa	极限拉伸强度σ_{st}/MPa
数值	168 000	0.26	750	1 442.9

1.2 MRSPCP爆破试验

运用静液压试验机对3组相同规格的MRSPCP进行短时爆破试验。根据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》，爆破压力不小于三倍公称压力。为了确保公称压力为1 MPa的MRSPCP在试验过程中破裂失效，试验设定的最低压力为3 MPa。

试验结果显示，管材失效破裂时，带材与管道基体之间的重叠区域发生沿带材缠绕方向的断裂，该区域钢丝网同样断裂，如图8所示。三组试样中，仅一组试样有钢带断裂的现象，其余两组的钢带无断裂现象；三组试样均出现钢丝网断裂现象。分析认为，熔焊区域由于管材几何不连续而出现应力集中，导致该局部区域更容易发生强度破坏。而钢带因其强度足够高、自身截面足够大而不易断裂，故管材试样中钢丝断裂是主要失效

形式。因此,基于试验现象与应力分析,将钢丝网断裂作为后续MRSPCP管材失效有限元分析的判据更为合理。



图8 失效试样

Fig.8 Failure specimen

2 有限元模拟

2.1 有限元模型

MRSPCP主要由聚乙烯基体、钢丝网和钢带三部分组成。为了更加贴合管道的实际结构,将HDPE基体拆分为内层、增强层和外层。被聚乙烯包裹的钢带(以下简称增强带)缠绕在管道基体的外表面。增强带中,钢带和包裹钢带的聚乙烯二者单独建模。钢丝网位于管道基体的增强层中。将钢丝网简化为轴向钢丝与环向钢丝。实际生产流程中,钢丝网以螺旋缠绕的形式覆盖整个管道,将轴向钢丝创建为相同长度的小段钢丝,长度为相邻增强带的宽度。实际生产中,带材缠绕熔融成管道会形成一段重叠区域,这一部分也需要单独建模。MRSPCP及部件结构如图9~13所示,具体的结构参数见表3~5。

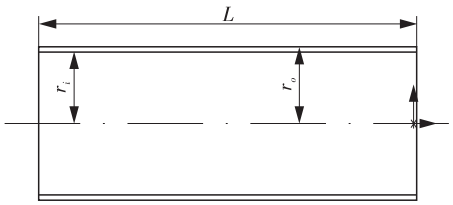


图9 HDPE基体剖面示意

Fig.9 HDPE matrix profile diagram

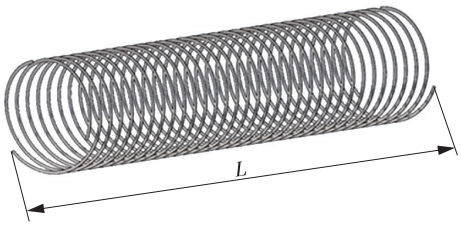


图10 钢带示意

Fig.10 Steel strip schematic diagram

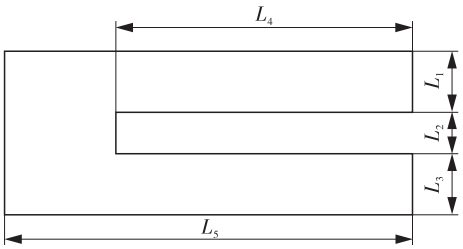


图11 钢带外聚乙烯截面结构

Fig.11 Cross-section structure of polyethylene outside steel strip

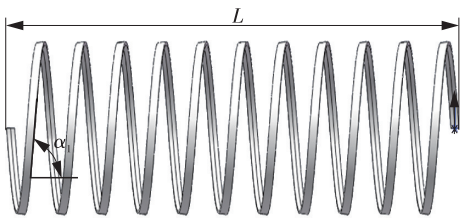


图12 增强带与基体重叠层示意

Fig.12 The schematic diagram of the overlapping layer between the reinforcing band and the matrix

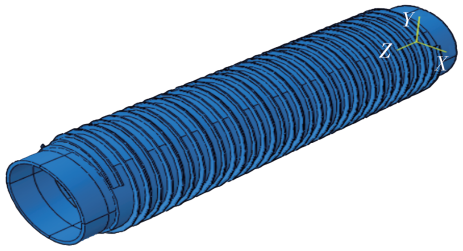


图13 完整MRSPCP模型示意

Fig.13 The complete MRSPCP model diagram

表3 管道基体结构参数

Tab.3 Structural parameters of pipeline matrix mm

参数	内径r_i	增强层直径r	外径r_o	长度L
数值	136	142	144.5	1 100

表4 钢丝结构参数

Tab.4 Steel wire structure parameters

参数	数值
钢丝直径d_{st}/mm	0.41
环向钢丝数N_1	88
轴向钢丝数N_2	663
环向钢丝缠绕角度α_1/(°)	82.36
轴向钢丝缠绕角度α_2/(°)	7.64

表5 钢带外聚乙烯结构参数

Tab.5 Structural parameters of polyethylene outside steel strip mm

参数	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
数值	1.5	1.3	1.5	10	13

2.2 载荷设置

在ABAQUS中设置辅助平面,将轴向钢丝分

成若干段，模拟实际管材中轴向钢丝的不连续性。将增强带与HDPE基体进行绑定，钢丝网内置于HDPE基体的增强层中。钢丝为T3D2单元，其余部件均用C3D8R单元。在实际试验中，钢丝在内压作用下会产生环向和轴向的变形，所以在管道两端施加位移边界条件与等效轴向载荷。为避免管道模型末端的应力集中，生成一根连接在MRSPCP内表面的刚体短管，再将位移的边界条件和等效轴向载荷应用于刚性短管。管道一端的所有自由度都应受到限制，在另一端的延伸段（材质与钢带一致）表面施加表面牵引力作为等效轴向载荷，以代表闭合端工况，如图14所示。直接在MRSPCP内表面施加内压载荷，如图15所示。

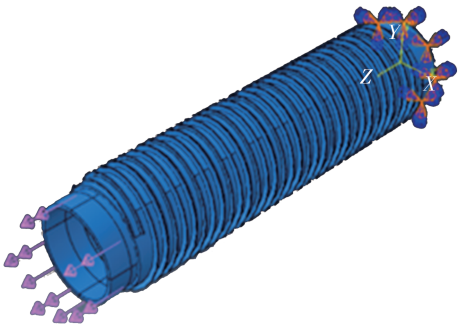


图14 载荷设置

Fig.14 Load setting

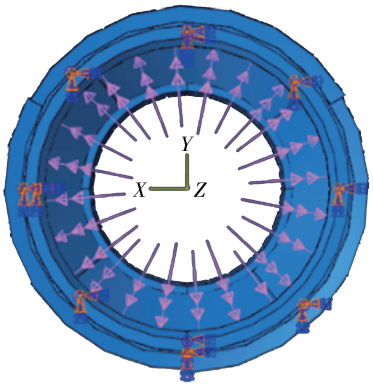


图15 内部压力

Fig.15 Internal pressure

表面牵引力的计算公式如下：

$$p_3\pi {r_i}^2 = 2\tau l\pi r_i \quad (2)$$

式中，p_3为内压，MPa；τ为表面牵引力，N；l为加载面牵引长度，mm；r_i为管道内壁半径，mm。

3 结果分析与讨论

3.1 有限元失效结果分析

为了分析MRSPCP模型是否失效，对模型各个部件的应力应变分布进行分析。最终确定将钢丝网断裂作为MRSPCP的失效准则。在步长时间为0.915时，如图16所示，钢丝网部分受到的最大应力刚好超过钢丝的极限应力，所以钢丝在这一步长时间内率先失效，因此，可以认为MRSPCP失效。此时，管道模型所承受的内压p_f=3.66 MPa，与爆破试验的结果吻合（如表6所示）。有限元模拟结果与试验结果的误差仅为4.41%。由此可见，有限元模型在预测爆破压力方面较为准确。

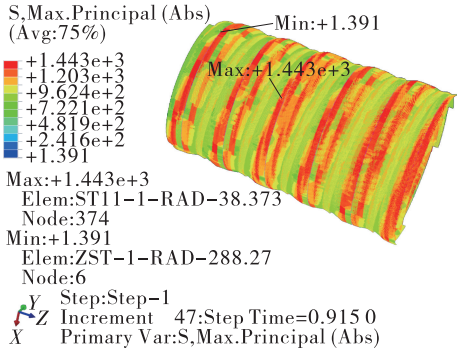


图16 MRSPCP失效时钢丝应力分布

Fig.16 Stress distribution of steel wire during MRSPCP failure

表6 不同方法的结果比较

Tab.6 Comparison of the results of different methods

试验结果/MPa	平均测试结果/MPa	有限元结果/MPa	相对误差/%
3.768 3.882 3.837	3.829	3.66	−4.44

进一步分析管材模型，在时间步长为0.915时，增强带中的钢带应力分布如图17所示，可以看出，钢带的最大主应力也接近其极限强度。

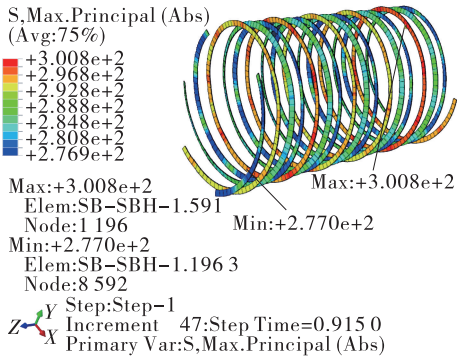


图17 MRSPCP失效时钢带应力分布

Fig.17 Stress distribution of steel strip during MRSPCP failure

HDPE的应变分布如图18所示，此时，HDPE还远未达到失效的程度。由于MRSPCP管材结构是由非均匀壁厚的带材螺旋缠绕而成，故带材上

壁厚小的区域应变大，反之应变小，这导致了HDPE应变分布云图也呈螺旋缠绕状。

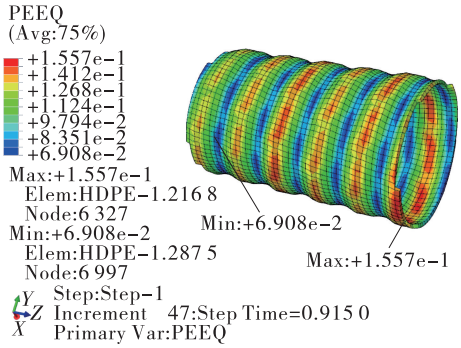


图18 MRSPCP失效时HDPE塑性应变分布

Fig.18 Plastic strain distribution of HDPE during MRSPCP failure

有限元模型模拟结果表明，在MRSPCP模型模拟失效过程中，钢丝和钢带几乎同时失效，这一结果与试验结果相吻合。这表明在MRSPCP中，钢丝网与钢带都起着重要的承载作用。由于钢丝和钢带是MRSPCP的主要承重部件，一旦钢丝和钢带失效，HDPE的载荷将因载荷转换而急剧上升，但是HDPE的极限强度相当低，没有钢丝和钢带的支撑，HDPE无法单独工作。

3.2 MRSPCP各部件承载分析

为了进一步分析MRSPCP中各个部件的承载能力，采用环向力学响应来表征其受力性能，并比较模型中各部件受力在总的环向力中所占的比例。

HDPE的圆周力F_{pe}计算公式如下：

$$F_{pe}=2\sigma_{pe}Lt \tag{3}$$

式中，σ_{pe}为应力，MPa；L为试样长度，mm；t为管壁厚度，mm。

钢丝的环向力F_{st}表达式为：

$$F_{st}=2\sigma_{st}AN\sin\alpha \tag{4}$$

式中，σ_{st}为应力，MPa；A为钢丝横截面积，mm^2；N为钢丝数量；α为缠绕角度，(°)。

钢带的环向力F_{sb}表达式为：

$$F_{sb}=F-F_{pe}-F_{st} \tag{5}$$

式中，F为管道的环向力，N。

经计算，钢丝网与钢带共同承载了57.1%的载荷，HDPE在环向载荷作用下承载了42.9%的载荷。可以看出，传统的HDPE管道在经过钢丝网的嵌入与钢带的复合后承载能力显著提高，MRSPCP能更好地抵抗环向应力。

图19示出各部件承载比例随着内部压力改变的趋势。可以看出，各部件的承载比例均在初始阶段急速上升，钢带尤为明显。然后迅速趋于平稳，在内部压力达到1.32 MPa之前几乎无太大的变化趋势，说明在内压达到1.32 MPa之前，3个部件均处于线性弹性状态。在这个过程中，钢带承载了大部分载荷。当内部压力超过1.32 MPa，钢带开始屈服，承载比例快速降低，而HDPE基体和钢丝的承载比例提升。当内部压力达到2.0 MPa左右时，钢丝开始发生塑性变形，承载比例下降。当内部压力上升到2.7 MPa左右时，HDPE的Mises应力接近其屈服强度，灰色曲线也开始下降。在最终阶段，由于钢丝的应力水平较高，所以钢丝的应力增加幅度最大，承载比例回升，而钢带和HDPE的应力-应变曲线在屈服后接近理想弹塑性曲线，二者的承载比例下降。

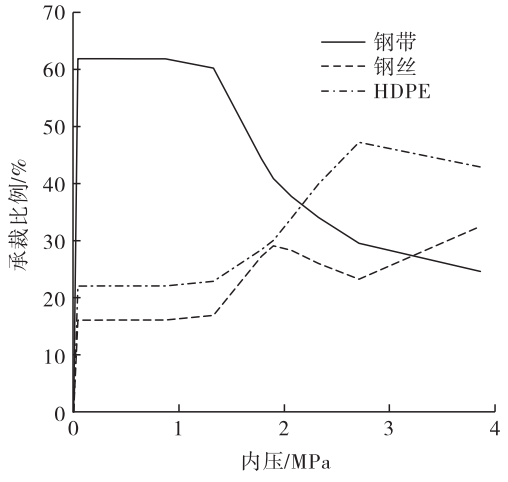


图19 各部件承载比例

Fig.19 Load ratio of each component

图20示出各部件在内部压力作用下等效塑性应变(PEEQ)的变化曲线。结合各部件的材料参数，在钢丝达到极限应变时，钢带和HDPE并没有达到各自的极限应变。从应变失效准则来看，钢丝失效亦可作为MRSPCP失效判别准则。

3.3 部件参数对性能的影响

3.3.1 钢丝直径的影响

分别创建钢丝直径为0，0.2，0.4，0.6，0.8，1 mm的MRSPCP模型进行有限元模拟。图21示出不同钢丝直径的MRSPCP模型失效压力的模拟结果。可以看出，钢丝直径为0时，MRSPCP的失效压力约为2.7 MPa。当钢丝直径从0增加至0.2 mm，管道的失效压力提升较小。当钢丝直径从0.2 mm依次增加至0.4，0.6，0.8 mm时，管道的失效压力呈线性增长，且幅度较大。与0.8 mm时

的失效压力相比，钢丝直径为1 mm时的失效压力增长趋于平稳。但总体而言，增大钢丝直径能较好地提高MRSPCP的失效压力。且适当增大钢丝直径也不会使钢丝的体积有太多的增加，比较具有性价比。

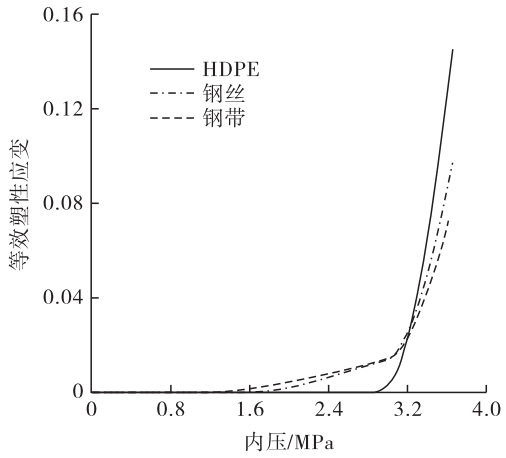


图20 内压下各部件的PEEQ曲线

Fig.20 PEEQ curve of each component under internal pressure

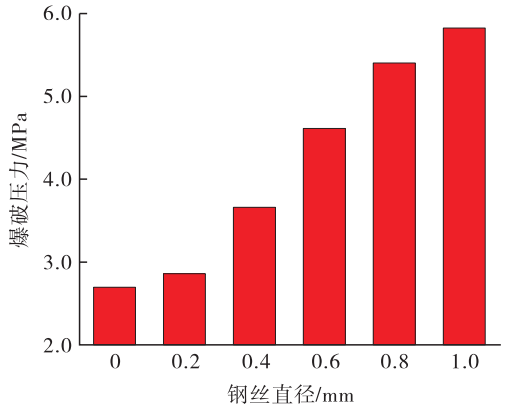


图21 不同钢丝直径的MRSPCP模型的失效压力

Fig.21 Failure pressure of MRSPCP model with different steel wire diameters

3.3.2 管道基体厚度的影响

MRSPCP的主体部分由HDPE构成，具有良好的韧性，可以承受很大程度的塑性变形。HDPE不仅为钢丝和钢带提供保护，也承受了一定的环向载荷。

分别创建管材厚度为4.5，5.5，6.5，7.5，8.5，9.5 mm的MRSPCP模型进行分析。图22示出不同管材壁厚的MRSPCP模型的失效压力结果。可以看出，增加管材厚度的确可以提高管材的力学性能，但是从4.5 mm增加至9.5 mm，管道在性能上的提升并不显著。此外，由于HDPE为管道的主体，整个管道的体积及材料用量会明显增多。因此，靠增加管材厚度来提升管道性能需要综合考虑经济效益、运输难度、性价比等多方面因素。

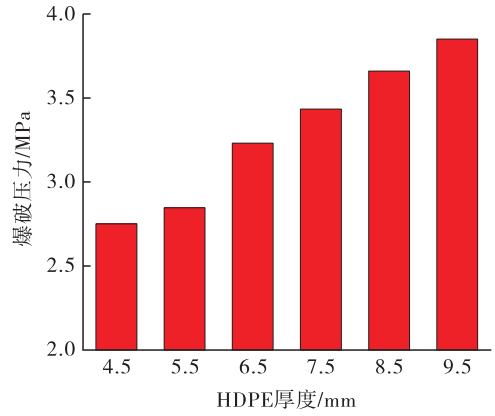


图22 不同管材壁厚的MRSPCP模型的失效压力

Fig.22 Failure pressure of MRSPCP model with different tube wall thickness.

3.3.3 钢丝缠绕角度的影响

在保证钢丝数量、钢丝直径等其他参数一致的条件下，分别创建缠绕角度为45°，55°，65°，75°，85°的MRSPCP模型进行分析。图23示出不同缠绕角度下MRSPCP模型的失效压力结果。可以看出，当缠绕角度为45°，55°，65°时，失效压力均低于3 MPa，管道承压能力不足；当缠绕角度从65°增加至85°，管道性能提升较大。因此，在确定好钢丝根数、钢丝直径等参数后，采用较大的缠绕角度可以有效提高管材的性能。

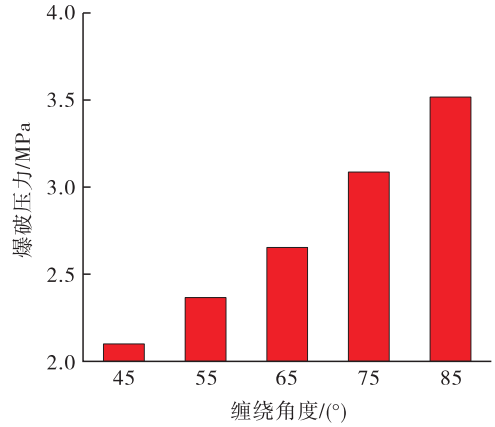


图23 不同钢丝缠绕角度的MRSPCP模型的失效压力

Fig.23 Failure pressure of MRSPCP model with different wire winding angles

对比钢丝直径、管材厚度、钢丝缠绕角度对管道性能的提升可以看出，仅增加钢丝直径，管道失效压力可从2.70 MPa提升至5.83 MPa；单纯增加

HDPE厚度同样可行,但其提升较小,并对HDPE的消耗过多,经济效益低;仅增大钢丝缠绕角度对管道失效压力的提升较小,但也需要合适的缠绕角度,确保管道有足够的承载能力。

4 结论

采用试验与数值模拟相结合的方法评估MRSPCP的力学性能。通过单轴拉伸试验获取管道各部件的材料属性参数。然后进一步开展爆破试验评估MRSPCP的力学性能,为模拟结果提供现实依据。最后建立有限元模型,针对承受内压作用的模型开展模拟分析。模拟结果与试验数据吻合,验证了模型的可靠性。

(1)根据爆破试验结果,得到平均爆破压力为3.83 MPa;将钢丝应力是否达到其强度极限作为MRSPCP的失效准则。在有限元模型中,通过钢丝的极限强度确定失效压力为3.66 MPa。将试验结果与有限元模拟结果进行对比,有限元模拟结果与试验结果的误差为-4.44%,表明有限元模型及管材失效判据准确、有效。

(2)有限元模拟分析表明,钢丝直径、管材厚度与缠绕角度均会影响MRSPCP的力学性能。增大钢丝直径和缠绕角度可以有效提高管道的承载能力;增加HDPE层的厚度可以延缓塑性变形的发生,从而提高管材的承载能力。但是,相比管材厚度和钢丝缠绕角度,钢丝直径对MRSPCP失效压力的影响远大于二者。所以考虑提高管材的性能时应优先考虑增加钢丝直径,并在此基础上考虑增大钢丝缠绕角度。

参考文献:

[1] 张炳杰,张玉珍,袁红.石油管道工程建设水平提升策略[J].化工管理,2015(4):188.
ZHANG B J, ZHANG Y Z, YUAN H. Strategies for improving the construction level of petroleum pipeline engineering [J]. Chemical Engineering Management, 2015(4):188.

[2] 杨辉,王琳,王富祥,等.环焊缝缺陷复合材料修复结构的抗弯性能分析[J].压力容器,2024,41(8):74-80.
YANG H, WANG L, WANG F X, et al. Analysis of bending properties of structures repaired by composite materials with girth weld defects [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(8):74-80.

[3] 姜棚仁,李永祥,徐雪萌,等.基于Fluent的小麦气力输送数值模拟研究[J].包装与食品机械,2023,41(3):1-6.
JIANG P R, LI Y X, XU X M, et al. Numerical simulation of pneumatic conveying of wheat based on Fluent [J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(3):1-6.

[4] 冯传智,罗雨,许耀波,等.管道全位置焊接机器人结构设计与运动学分析[J].机电工程,2024,41(8):1489-1499.
FENG C Z, LUO Y, XU Y B, et al. Structural design and kinematics analysis of pipeline all-position welding robot [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(8):1489-1499.

[5] 李福明.践行国企责任担当谱写管道发展新篇[J].大庆社会科学,2019(3):49-50.
LI F M. Practicing the responsibility of state-owned enterprises to write a new chapter in pipeline development [J]. Daqing Social Sciences, 2019(3): 49-50.

[6] 朱祖超,崔宝玲,张光,等.LNG储运安全保障技术发展与展望[J].流体机械,2024,52(9):84-97.
ZHU Z C, CUI B L, ZHANG G, et al. Current development and prospect of LNG storage and transportation and safety protection technology [J]. Fluid Machinery, 2024, 52(9):84-97.

[7] 卢召红,何琳琳,徐艳,等.薄壁内衬复合管衬层径向临界脱层屈曲分析[J].压力容器,2023,40(4):37-44.
LU Z H, HE L L, XU Y, et al. Analysis of radial critical delamination buckling of a thin-walled lined composite pipe liner [J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(4):37-44.

[8] 曾和友,李铁钉,雷波,等.油气管道球阀结构设计改进及性能试验研究[J].流体机械,2023,51(10):18-23.
ZENG H Y, LI T D, LEI B, et al. Structural design improvement and experimental study of oil and gas pipeline ball valve [J]. Fluid Machinery, 2023, 51(10):18-23.

[9] 石婉莹.多重增强钢塑复合压力管自动封口控制研究[D].廊坊:北华航天工业学院,2024.
SHI W Y. Research on automatic sealing control of multi-reinforced steel-plastic composite pressure pipe [D]. Langfang: Beihua Aerospace Institute of Technology, 2024.

[10] ZHENG J Y, HOU D S, ZHONG S J, et al. Effect of viscoelasticity on the hold pressure of plastic pipe reinforced by cross helically wound steel wires in leak test [J]. Composite Structures, 2015, 133:756-763.

[11] ZHENG J Y,SHI J,SHI J F,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] BAI Y,HAN P H,LIU T,et al.Mechanical responses of metallic strip flexible pipe subjected to combined bending and external pressure[J].Ships and Offshore Structures,2017,13(3):320-329.

[13] BAI Y,LIU T,RUAN W D,et al.Mechanical behavior of metallic strip flexible pipe subjected to tension[J].Composite Structures,2017,170:1-10.

[14] CHEN W,XIONG H C,BAI Y.Failure behavior analysis of steel strip-reinforced flexible pipe under combined tension and internal pressure[J].Journal of Thermoplastic Composite Materials,2018,33(6):727-753.

[15] XU Y X,FANG P,BAI Y.Mechanical behavior of metallic strip flexible pipes during reeling operation[J].Marine Structures,2021,77:102942.

[16] 伍金奎,倪奉尧,孔涛,等.高压钢丝管的高温性能及其应用[J].塑料工业,2023,51(1):163-167.
WU J K,NI F Y,KONG T,et al.High-temperature properties and applications of high-pressure cross helically wound steel wires reinforced polyethylene composite pipe[J].China Plastics Industry,2023,51(1):163-167.

[17] 伍金奎,倪奉尧,孔德地,等.10 MPa钢丝缠绕增强聚乙烯复合管的制备及其性能[J].塑料工业,2022,50(3):160-164.
WU J K,NI F Y,KONG D D,et al.Preparation and properties of 10 MPa cross helically wound steel wires reinforced polyethylene composite pipe[J].China Plastics Industry,2022,50(3):160-164.

[18] 徐广丽,秦绪,陈全,等.钢丝缠绕增强聚乙烯复合管集输服役后的承压性能[J].油气储运,2022,41(10):1168-1174.
XU G L,QIN X,CHEN Q,et al.Pressure bearing capacity of polyethylene composite pipe reinforced by steel wires after gathering service[J].Oil & Gas Storage and Transportation,2022,41(10):1168-1174.

[19] 高茂鑫.扭转载荷下钢带缠绕增强复合管结构响应研究[J].科技创新与应用,2022,12(2):20-22.
GAO M X.Research on the structural response of steel strip winding reinforced composite pipe under torsional load[J].Technological Innovation and Application,2022,12(2):20-22.

[20] 张吉祥.内压作用下纤维增强柔性复合输氢管道的力学特性研究[D].北京:中国石油大学(北京),2023.
ZHANG J X.Study on mechanical properties of fiber reinforced flexible composite hydrogen pipeline under internal pressure[D].Beijing:China University of Petroleum(Beijing),2023.

[21] PATNAIK G,RAJPUT A.Safety assessment of underground steel pipelines with CFRP protection against subsurface blast loading[J].Structures,2023,54:1541-1559.

[22] PATNAIK G,KAUSHIK A,RAJPUT A,et al.Ballistic performance of quasi-isotropic CFRP laminates under low velocity impact[J].Journal of Composite Materials,2021,55(24):3511-3527.

[23] DJERRAD A,FAN F,ZHI X,et al.Experimental and numerical studies on AFRP-reinforced thin-walled tubes under axial impact loading[J].International Journal of Impact Engineering,2024,190:104974.

[24] DJERRAD A,FAN F,ZHI X D,et al.Experimental and FEM analysis of AFRP strengthened short and long steel tube under axial compression[J].Thin-Walled Structures,2019,139:9-23.

[25] DJERRAD A,FAN F,ZHI X D,et al.Artificial neural networks (ANN) based compressive strength prediction of AFRP strengthened steel tube[J].International Journal of Steel Structures,2019,20(1):156-174.

[26] SEBEAY T A,AHMED A.Numerical investigation into GFRP composite pipes under hydrostatic internal pressure[J].Polymers,2023,15(5):1110.

作者简介:胡名震(2002),男,硕士研究生,主要从事承压设备安全研究工作,通信地址:430205湖北省武汉市东湖高新区光谷一路206号武汉工程大学,E-mail:750597075@qq.com。

通信作者:师俊(1986),男,博士,副教授,主要从事承压设备结构设计、复合结构失效分析研究工作,通信地址:430205湖北省武汉市东湖高新区光谷一路206号武汉工程大学,E-mail:shijun@wit.edu.cn。

本文引用格式:
胡名震,吕杰,袁蓓,等.内压作用下多重增强钢塑复合管力学性能分析[J].压力容器,2025,42(6):25-34.
HU Mingzhen,LYU Jie,YUAN Bei,et al.Analysis of mechanical properties of multi-reinforced steel-plastic composite pipe under internal pressure[J].Pressure Vessel Technology,2025,42(6):25-34.