

内外压作用下 CIPP 修复腐蚀穿孔供水钢管承载特性

许俊松¹, 李斌², 李鹏举², 张佳佳¹

(1. 中建七局第二建筑有限公司, 江苏 昆山 215310; 2. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 【目的】针对内外压共同作用下原位固化内衬 (Cured-in-Place Pipe, CIPP) 技术修复穿孔腐蚀供水钢管的力学承载特性进行了研究。【方法】开展了 CIPP-腐蚀钢管复合结构足尺试验, 构建了考虑钢管-内衬界面粘结作用的三维有限元模型, 基于实测和模拟结果分析了外压、管径、穿孔半径、CIPP 厚度及弹性模量等参数对复合结构应力响应的影响规律。【结果】CIPP 修复能够显著削弱穿孔边缘应力集中, 形成钢管与内衬协同承载机制; 在研究范围内, 随着外压增大, 钢管与内衬协同变形增强, 钢管最大应力降幅由 50.0% 减小至 12.1%; 管径增大导致钢管最大应力降幅由 42.4% 减小至 23.7%, 削弱修复效果; 穿孔半径增大, 内衬承担更多跨孔载荷, 钢管最大应力降幅由 25.9% 增至 44.6%; 增加 CIPP 厚度可有效降低内衬应力水平, 而提高弹性模量对钢管受力状态的改善效果有限。

【结论】研究结果可为 CIPP 修复腐蚀供水钢管的结构设计及工程应用提供理论依据。

关键词: 腐蚀钢管; 穿孔缺陷; CIPP 修复; 内外压作用; 力学承载性能; 有限元分析

中图分类号: TU991.36/TU392.3

文献标识码: A

地下供水钢管是城市供水系统的重要组成部分, 其结构安全直接关系到供水保障能力及城市基础设施的稳定运行^[1]。受土壤腐蚀、电化学腐蚀及长期服役荷载等因素影响, 大量供水钢管在服役过程中会出现壁厚减薄、局部腐蚀甚至穿孔等病害^[2]。对于高龄埋地供水钢管, 其服役环境更为复杂, 管道内部承受持续的运行水压力, 外部则受到覆土荷载、地下水压力及交通荷载等作用, 其中覆土荷载和地下水压力构成管道主要外部静荷载, 交通荷载则可能引起外部荷载的时空波动。在内外荷载共同作用下, 腐蚀缺陷处易产生局部应力集中, 严重时可能导致泄漏、爆管甚至地面塌陷等事故, 威胁城市供水系统运行安全^[3]。因此, 如何有效恢复腐蚀管道的结构承载能力并准确评估其在实际内外荷载环境下的服役安全, 已成为城市供水管网更新改造领域亟待解决的关键问题。

非开挖修复技术因施工效率高、交通影响小及环境扰动小等优点, 已成为城市地下管网更新改造的重要手段^[4-6]。其中, 原位固化内衬 (Cured-in-Place Pipe, CIPP) 技术通过在既有管道内部形成连续的高强度内衬, 使修复后的结构形成由原管道与 CIPP 内衬共同承担荷载的复合结构, 可有效改善

管道整体刚度和承载能力, 在排水管道修复领域已得到广泛应用^[7-9]。然而, 传统 CIPP 内衬多采用非食品级树脂及玻璃纤维增强材料, 且部分固化工艺可能释放苯乙烯等挥发性物质, 用于供水管道时存在潜在的饮用水安全风险, 因此在供水领域的应用受到一定限制^[10]。目前, 供水管道非开挖修复主要采用不锈钢内衬、穿插内衬及喷涂修复等技术, 但仍存在适用范围有限、过流能力降低或结构补强效果不足等问题^[11-13]。近年来, 随着食品级树脂体系、无玻纤增强材料及低挥发性固化工艺的发展, CIPP 技术的材料安全性和工程适用性不断提高, 逐步应用于供水管道结构性修复, 为高龄腐蚀供水钢管的非开挖更新改造提供了新的技术途径^[14]。

目前, 围绕 CIPP 修复技术的研究已形成较为系统的研究体系, 主要涉及材料性能、界面力学行为及复合结构承载性能等方面^[15,16]。已有研究针对不同类型 CIPP 材料开展了力学性能及失效机理分析, 揭示了材料组成和固化工艺对内衬力学性能的影响规律^[17]; 通过结构试验与数值模拟相结合的方法, 分析了内衬厚度、腐蚀程度及结构缺陷等因素对复合结构承载能力、应力分布及界面响应的影响^[18,19]。此外, CIPP 技术已逐步拓展至埋地管道抗震

收稿日期/Received: 2026-07-17

修回日期/Revised: 2026-09-02

基金项目: 中建七局科技研发课题 (CSCEC7b-2025-Z-8); 郑州大学青年学生基础研究项目 (博士研究生) (ZDBJ2026064); 国家自然科学基金青年项目 (52208375)。

第一作者: 许俊松 (1993—), 男, 工程师, 硕士, 从事市政工程方面的研究。E-mail: xujunsong@cscec.com。

通信作者: 李鹏举 (2000—), 男, 在读博士研究生, 从事地下管网结构安全与非开挖修复方面的研究。E-mail: L18903826697@163.com。

性能提升及结构加固等领域，相关研究表明 CIPP 能够改善管道整体受力状态并提高结构承载能力^[20,21]。然而，现有研究多集中于完整管道、一般腐蚀管道或单一内压作用条件，对具有穿孔缺陷的供水钢管研究相对不足，尤其对埋地环境下内水压力与覆土、地下水及交通等外部荷载共同作用时钢管-CIPP 复合结构的荷载传递机制和应力响应规律认识仍不充分^[22-25]。此外，实际腐蚀缺陷具有明显的随机性和不规则性，不同缺陷尺度及形态对 CIPP 修复效果的影响也有待进一步明确。因此，有必要针对典型穿孔腐蚀缺陷建立合理的试验与数值分析方法，进一步揭示内外压共同作用下 CIPP 修复腐蚀钢管的结构响应及主要影响因素。

基于此，开展了内外压共同作用下 CIPP 修复穿孔腐蚀供水钢管力学承载试验，建立了考虑界面粘结损伤的三维有限元模型，并系统分析了外压、管径、穿孔半径、CIPP 厚度及弹性模量等参数对复合结构应力分布与承载性能的影响规律，阐明了 CIPP 修复后钢管的应力分布特征及承载性能变化规律，为供水钢管非开挖修复设计与安全评估提供理论依据。

1 试验设计

1.1 CIPP 修复穿孔钢管复合结构

CIPP 修复腐蚀穿孔钢管复合结构由钢管与 CIPP 内衬共同组成。考虑实际供水钢管的结构尺度及足尺试验条件，本文选用长度为 2.0 m、公称

直径为 400 mm、壁厚为 8.0 mm 的钢管作为试验基管，并结合 CIPP 内衬制备条件及结构补强需求，将 CIPP 内衬设计厚度确定为 4 mm。上述钢管尺寸能够较好满足足尺试验对试件尺度及加载空间的要求，同时兼顾试验可操作性与结果代表性。为研究腐蚀穿孔缺陷对修复结构受力性能的影响，在管壁预制半径为 75 mm 的穿孔缺陷。实际服役钢管的腐蚀缺陷通常具有随机性和不规则性，其形态、边缘特征及空间分布与规则圆形穿孔存在一定差异。本文为便于定量分析缺陷尺寸对复合结构力学响应的影响，并保证试验条件的一致性和可重复性，将腐蚀穿孔缺陷简化为规则圆形。采用激光切割工艺在钢管壁上加工穿孔，以确保缺陷尺寸及几何形态的精确可控。CIPP 内衬主要由聚酯纤维增强层、非渗漏 PE 膜及环氧树脂基体组成。其中，树脂基体采用常温固化型环氧树脂体系，由环氧树脂 A 组分与固化剂 B 组分按质量比 4:1 混合配制而成。钢管与 CIPP 内衬的力学性能参数通过材料试验获得，具体参数见表 1。CIPP 内衬的制备与成型工艺如图 1 所示。

表 1 钢管与 CIPP 内衬材料力学性能参数
Tab.1 Mechanical properties of the steel pipe and CIPP liner materials

材料	弹性模量 E/GPa	屈服强度 σ_y/MPa	抗拉强度 σ_u/MPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{kg}\times\text{m}^{-3})$
钢管	210.1	325.0	488.2	0.3	7800
CIPP	1.9	25.2	65.5	0.3	1800

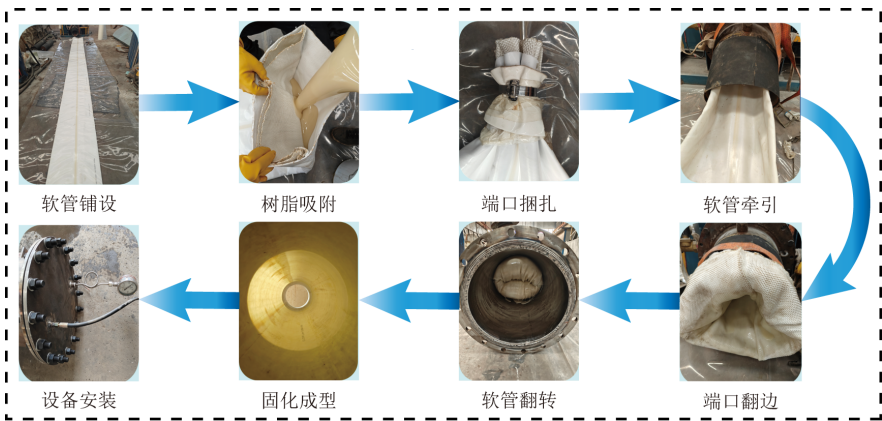


图 1 CIPP 内衬的制备与成型工艺

Fig.1 Preparation and installation process of the CIPP liner

1.2 内外压试验装置

CIPP 修复腐蚀钢管复合结构的力学承载试验装置如图 2 所示。试验系统主要由穿孔钢管试件、CIPP 内衬、法兰及盲板密封组件、内压加载系统、外压加载系统和压力监测系统组成。试件两端采用

法兰与盲板连接，并通过螺栓紧固形成封闭空间，在法兰连接处设置橡胶密封圈以保证系统密封性能。钢管穿孔位置设置外压三通装置，用于向钢管与 CIPP 内衬之间的环形空腔施加外部水压力，从而模拟地下管道受地下水和周围土体压力作用的

服役环境。为实现内外压独立控制，试验系统配置两套压力加载装置。其中，内压压力泵通过端部盲板上的进水接口向 CIPP 内衬内部注水并施加压力；外压压力泵通过外压三通装置向钢管与 CIPP 内衬之间的环形空腔注水加压。内、外压系统均配备压力表，可实时监测加载过程中压力变化情况。

试验开始前，分别向内压系统和外压系统注水，并排除管道及环形空腔内残余空气。启动内压压力泵，将管内压力加载至预设值并保持恒定；在此基础上启动外压压力泵，按照设定加载速率逐级提高外压。每级压力达到目标值后保压 5 min，待结构响应稳定后采集试验数据。加载过程中实时监测内、外压变化情况，以确保压力稳定性和试验安全性。试验结束后，按照与加载相反的顺序逐步卸除外压和内压，完成整个试验过程。

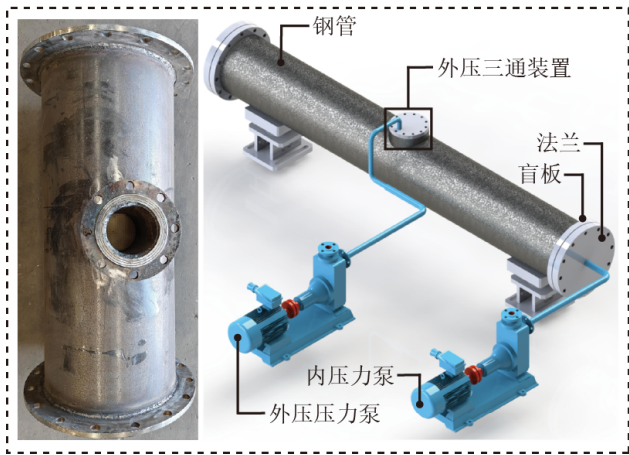


图 2 CIPP 修复腐蚀钢管复合结构试验装置
Fig.2 Experimental setup for the CIPP-lined corroded steel pipe composite structure

1.3 试验工况设计

埋地供水钢管实际服役过程中同时受到管内运行压力和管外环境荷载作用，其中管外压力主要与覆土、地下水及交通荷载等因素有关。为合理确定试验外压水平，依据《GB 50268-2008 给水排水管道工程施工及验收规范》^[26]中的土荷载计算方法，综合考虑覆土荷载及地下水压力等因素，对管道外压进行估算，确定试验外压范围为 0.05~0.35 MPa。该外压为实际埋地管道外部综合荷载的等效表征，实际工程中应结合具体埋地条件确定。试验采用内外压共同作用加载方式，管内压力模拟供水管道正常运行工况，恒定取 0.40 MPa；外压作为主要控制变量，分别取 0.05、0.15、0.25 和 0.35 MPa，以分析不同外压条件下 CIPP 修复穿孔腐蚀钢管复合结构的应力分布及承载性能。

1.4 测点布置与数据采集

为获取腐蚀区域及 CIPP 修复结构在内外压共同作用下的应变响应特征，在试件腐蚀缺陷附近布设电阻应变计，测点布置如图 3 (a) 所示。分别在受载区域边界的 0°、90°、180°和 270°位置布设测点，同时在受载区中心位置设置测点，以监测关键部位的应变变化规律。

试验采用 BE120-3AA-P100 型电阻应变计进行应变测量，其标称电阻为 120 Ω，灵敏系数为 2.22±1%。所有测点均接入 DN3816N 型静态应变测试系统，实现多通道同步采集，测试系统工作原理如图 3 (b) 所示。数据采集频率设置为 5 Hz，量程为±50000 με，以满足试验过程中应变响应的实时监测需求。在加载过程中，同步记录各测点应变及内、外压力变化数据。

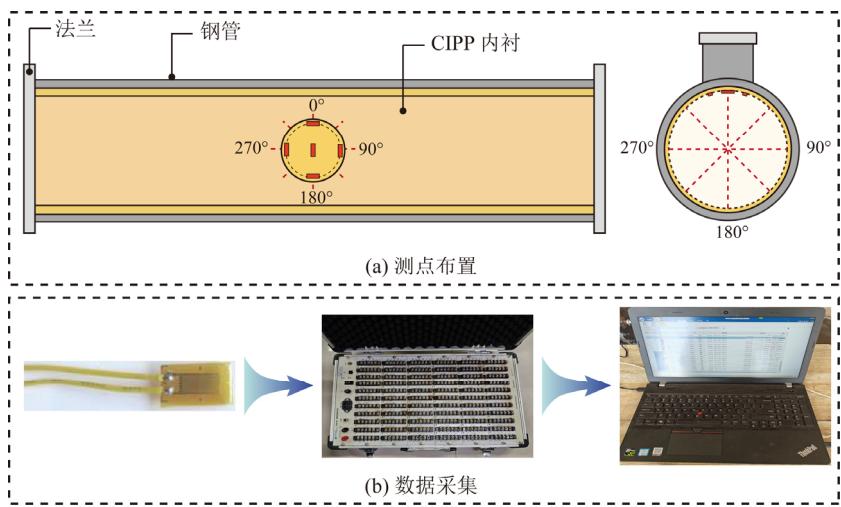


图 3 试验测点布置与数据采集

Fig.3 Layout of measuring points and data acquisition system

2 有限元模型

2.1 CIPP-腐蚀钢管复合结构模型

采用 ABAQUS 建立 CIPP 修复腐蚀钢管三维有限元模型，钢管与 CIPP 内衬的材料参数均取自试验实测结果，材料本构关系采用弹塑性模型进行描述。复合结构由钢管与 CIPP 内衬共同组成，如图 4 所示。其中， H_{cr} 为腐蚀穿孔半径。模型网格

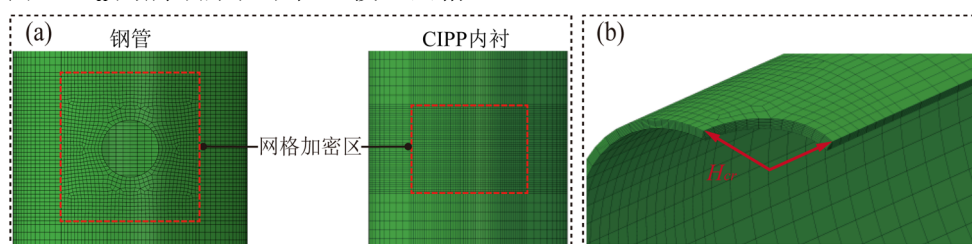


图 4 CIPP-腐蚀钢管复合结构有限元模型

Fig.4 FE model of the CIPP-corroded steel pipe composite structure

2.2 边界条件与荷载施加

为真实模拟试验加载过程，有限元模型两端均施加固定约束，以限制钢管及 CIPP 内衬的轴向位移和转动自由度。考虑试验过程中复合结构同时受到内压与外压作用，在模型内壁施加均布内压，在腐蚀穿孔区域及其邻近外表面施加均布外压，分别模拟管道运行压力和外部环境荷载作用。有限元模型的边界条件与荷载施加方式如图 5 所示。

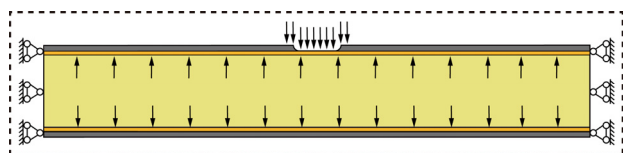


图 5 有限元模型边界条件与荷载施加

Fig.5 Boundary conditions and loading scheme of the FE model

2.3 CIPP-钢管界面接触模型

CIPP 内衬与钢管之间的界面传力性能直接影响复合结构的协同受力效果。为模拟界面的粘结、损伤及失效过程，采用 Cohesive 内聚力模型描述 CIPP 与钢管之间的界面力学行为^[27]。在 ABAQUS 中，通过嵌入零厚度 Cohesive 单元建立界面模型，界面单元嵌入流程如图 6 所示。本文建立的 Cohesive 界面模型主要表征施工质量良好、CIPP 与钢管内壁形成有效粘结的正常修复状态。实际工程中，施工质量及长期服役老化可能导致界面性能离散甚至局部脱粘，因此本文未考虑大范围界面空隙和初始脱粘等缺陷。对于存在明显界面脱粘或严重老化的情况，则需结合实际界面状态进一步调整界面参数。

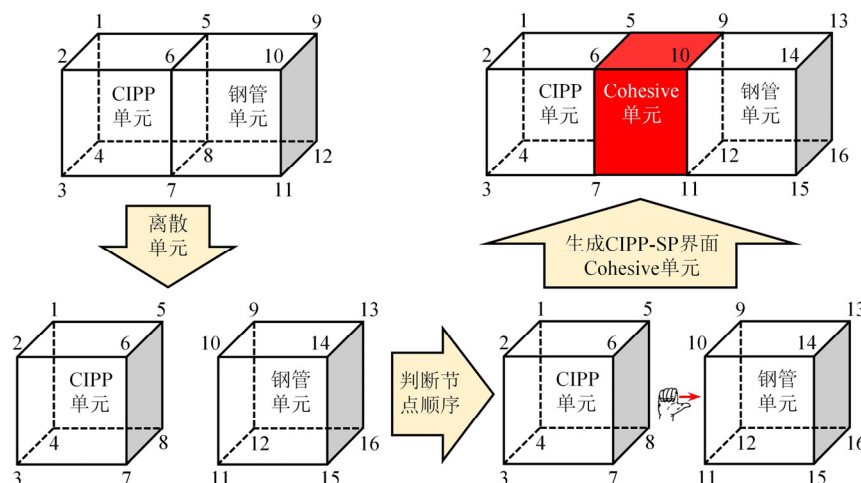


图 6 CIPP-钢管界面 Cohesive 单元嵌入流程

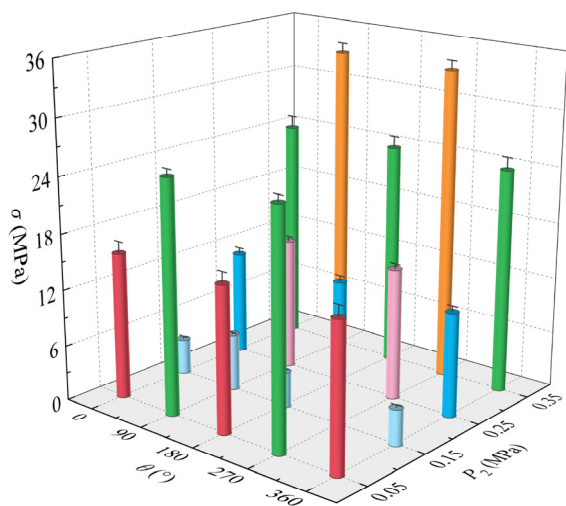
Fig.6 Embedding procedure of Cohesive elements at the CIPP-steel pipe interface

2.4 模型验证

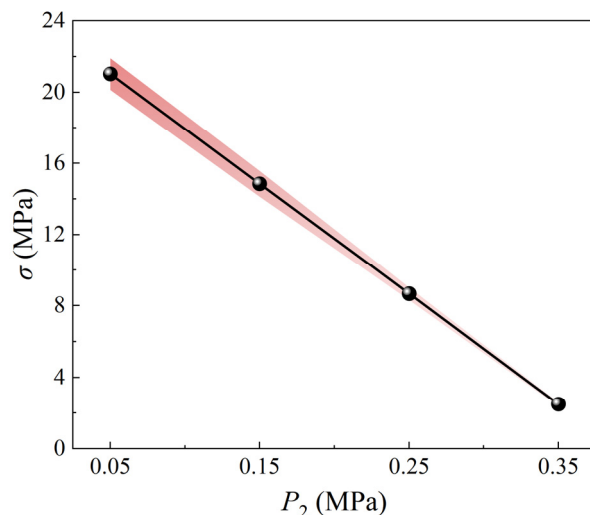
为验证所建立有限元模型的可靠性,以管道穿孔边界及 CIPP 内衬受载区中心位置的应力水平、分布规律及危险部位为评价指标,将数值模拟结果与试验结果进行对比分析,结果如图 7 所示。由图 7(a)可知,CIPP 修复后穿孔边界处的应力分布呈明显非均匀特征,试验与数值模拟均表明 90° 和 270° 方向的应力显著高于 0° 和 180° 方向,二者识别出的主要应力集中区域及危险部位一致,表明有限元模型不仅能够较好预测穿孔边界的应力水平,还能够反映结构危险位置。有限元结果能够较好地反映应力沿周向的变化规律,最大相对误差为 8.5%。由图 7(b)可知,在内外压共同作用下,随

着外压水平的提高,CIPP 内衬受载区中心位置的应力逐渐减小,数值模拟结果与试验结果变化趋势一致,最大相对误差为 7.2%。

试验与模拟之间存在一定偏差,主要源于实际试件与理想化数值模型之间的差异,包括 CIPP 材料性能的非均质性、CIPP 与钢管界面黏结状态的离散性,以及试件安装和加载边界条件的不确定性等。上述因素可能导致局部应力水平存在一定差异,但未改变应力集中区域、危险部位及随外压变化的基本规律。综合来看,所建立的 CIPP-腐蚀钢管复合结构有限元模型具有较好的可靠性和适用性,可用于后续参数分析。



(a) 穿孔边界



(b) CIPP 受载中心

图 7 试验与数值模拟结果对比

Fig.7 Comparison between experimental and numerical simulation results

3 内外压下复合结构承载特性

3.1 外压影响

在内压保持 0.4 MPa 条件下,不同外压作用时 CIPP 修复前后穿孔钢管内壁应力云图如图 8 所示。修复前,钢管内壁最大应力主要集中于穿孔缺陷上下边缘。随着外压由 0.05 MPa 增大至 0.35 MPa,最大应力略有下降,降幅约 4.4%,主要是由于外压增大使管道内外压差减小,从而降低内压引起的环向拉应力,但穿孔边缘仍为主要应力集中区域。

CIPP 修复后,穿孔区域高应力范围明显缩小。随着外压由 0.05 MPa 增大至 0.35 MPa,修复后最大应力较修复前分别降低 50.0%、37.8%、25.2%和 12.1%,表明外压增大后 CIPP 修复的应力削减效

果逐渐减弱。这是由于外压提高使钢管与 CIPP 内衬的受力状态发生变化,缺陷区域的荷载分担作用增强,进而使修复结构的局部应力水平升高。

图 9 给出了不同外压下钢管穿孔内外边界的 Von Mises 应力分布。修复前,穿孔内边界峰值始终明显高于外边界,且峰值主要位于 90° 和 270° 附近。随着外压增加,外边界峰值由约 21 MPa 增至 40 MPa,而内边界峰值基本维持在 70 MPa 左右,说明外压增加对穿孔外缘应力的影响更为明显。修复后,内边界峰值降至约 62 MPa,周向波动明显减小。随着外压增加,内边界应力整体上升,而外边界应力趋于平缓,表明 CIPP 内衬参与缺陷区域承载并促进了荷载在钢管与内衬之间的重新分配。

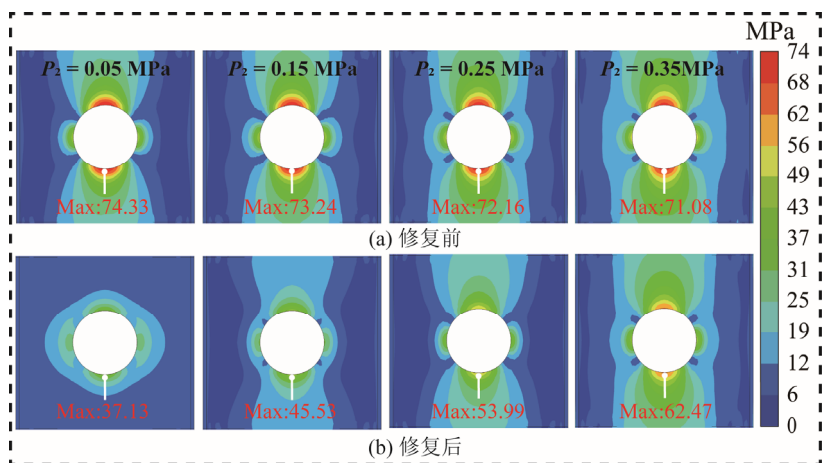
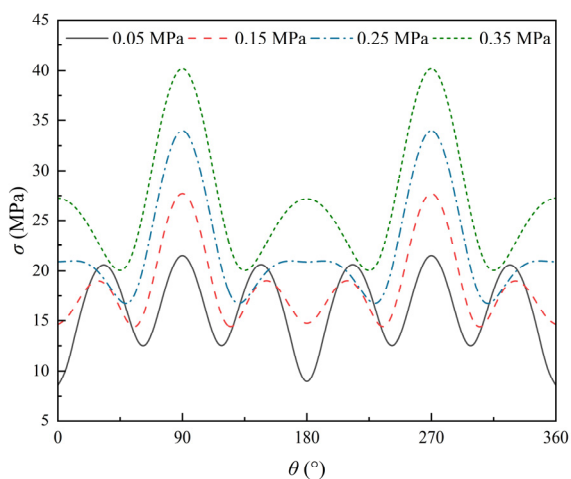
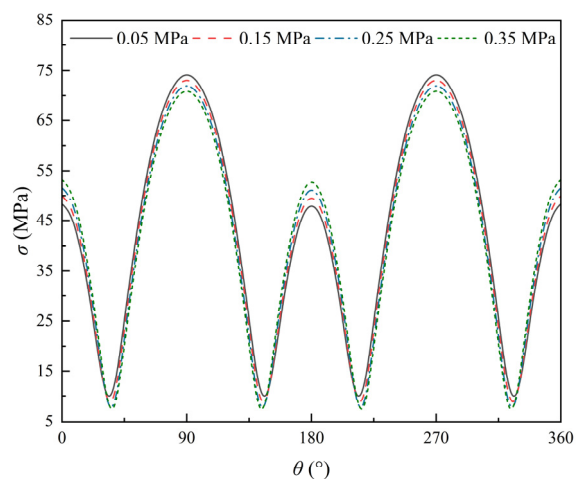


图 8 不同外压下 CIPP 修复前后穿孔钢管内壁应力云图

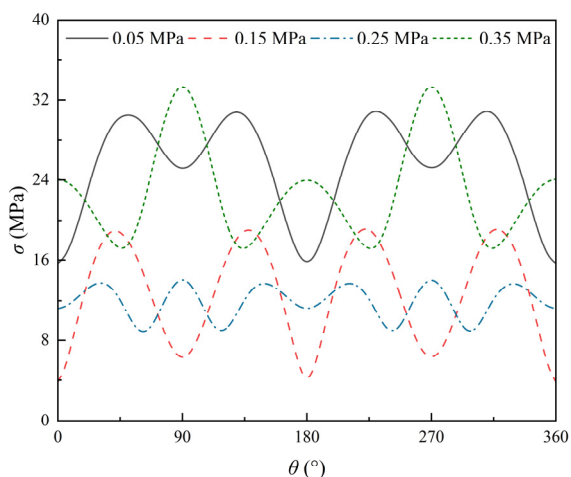
Fig.8 Stress contours of the inner wall of the perforated steel pipe before and after CIPP rehabilitation under different external pressures



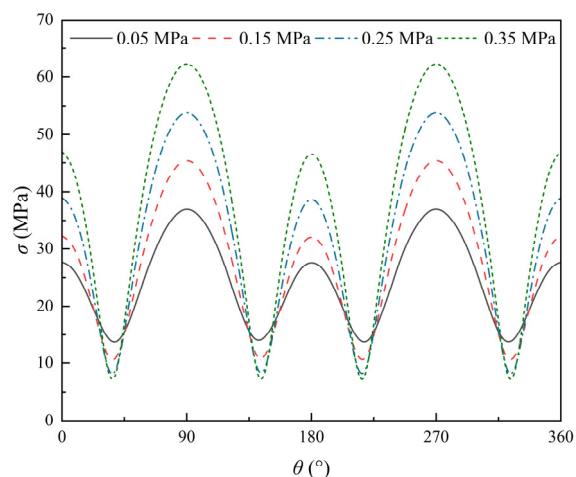
(a) 修复前穿孔外边界



(b) 修复前穿孔内边界



(c) 修复后穿孔外边界



(d) 修复后穿孔内边界

图 9 不同外压下 CIPP 修复前后钢管穿孔内外边界应力

Fig.9 Stress distributions along the inner and outer boundaries of the perforation before and after CIPP rehabilitation under different external pressures

3.2 管径影响

在内压 0.4 MPa、外压 0.15 MPa 条件下，不同

管径下 CIPP 修复前后穿孔钢管内壁应力云图如图 10 所示。修复前，各工况最大应力均集中于穿孔缺

陷上下边缘。随着管径由 300 mm 增大至 600 mm，最大应力整体增加，600 mm 管径较 300 mm 管径提高约 61.5%，表明在相同内外压作用下，管径增大使管壁承受的环向应力水平提高，穿孔缺陷对应力集中的影响更加明显。

修复后，最大应力较修复前分别降低 42.4%、

37.8%、33.6%和 23.7%，且随管径增大，应力削减幅度逐渐减小。这主要是由于管径增大后缺陷区域变形水平提高，跨越穿孔的 CIPP 内衬承担的局部荷载增加，使其对钢管应力集中的削减作用受到限制。

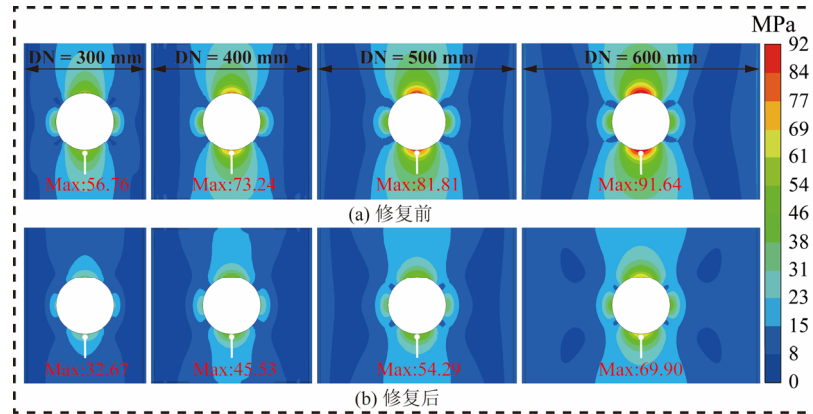
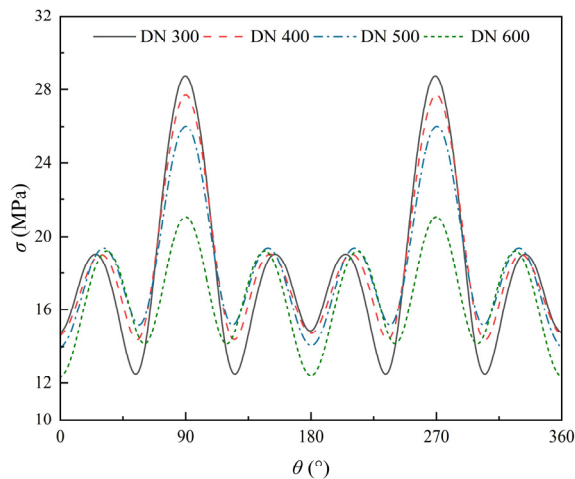


图 10 不同管径下 CIPP 修复前后穿孔钢管内壁应力云图

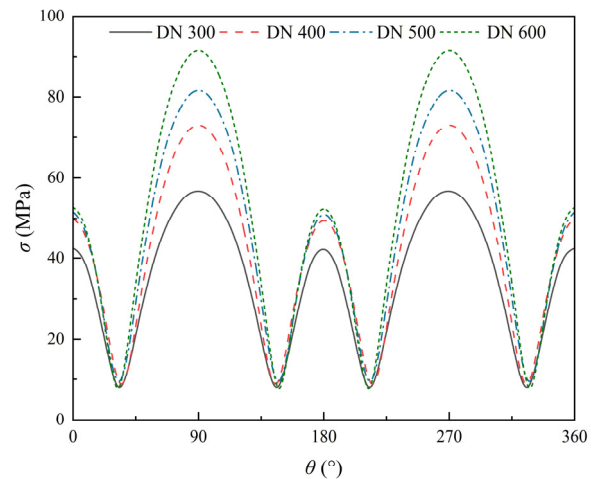
Fig.10 Stress contours of the inner wall of the perforated steel pipe before and after CIPP rehabilitation with different pipe diameters

图 11 给出了不同管径下穿孔内外边界的 Von Mises 应力分布。修复前，随着管径由 300 mm 增大至 600 mm，外边界峰值由约 29 MPa 降低至 21 MPa，而内边界峰值由约 57 MPa 增至 91 MPa，表明管径增大后应力进一步向穿孔内缘集中。修复

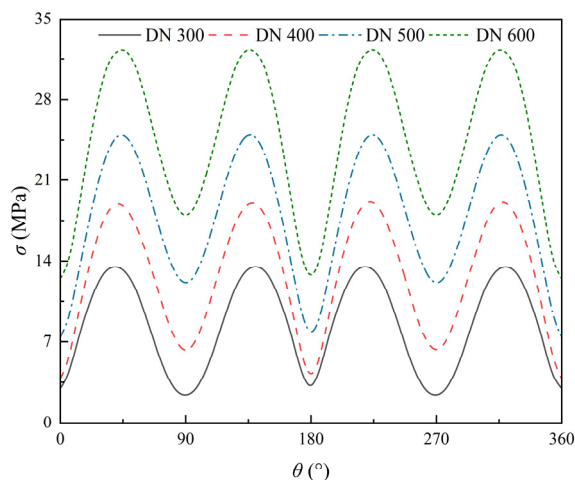
后，内边界应力峰值较修复前分别降低 42.1%、37.0%、34.1%和 24.2%，但外边界峰值由约 14 MPa 增至 33 MPa。说明随着管径增大，钢管与 CIPP 之间的荷载传递范围扩大，而钢管缺陷内缘仍是主要危险区域，导致整体修复效果逐渐减弱。



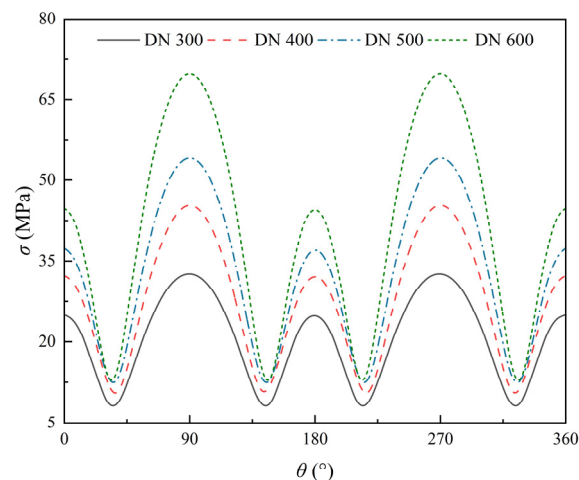
(a) 修复前穿孔外边界



(b) 修复前穿孔内边界



(c) 修复后穿孔外边界



(d) 修复后穿孔内边界

图 11 不同管径下 CIPP 修复前后钢管穿孔内外边界应力

Fig.11 Stress distributions along the inner and outer boundaries of the perforation before and after CIPP rehabilitation with different pipe diameters

3.3 穿孔半径影响

不同穿孔半径下 CIPP 修复前后穿孔钢管内壁应力云图如图 12 所示。修复前，最大应力主要集中于穿孔上下边缘。随着穿孔半径由 50 mm 增大至 125 mm，最大应力呈先增大后略有降低的趋势：半径由 50 mm 增至 100 mm 时最大应力提高约 37.2%，继续增至 125 mm 后降至 70.51 MPa，较 100 mm 工况降低约 6.8%。这表明缺陷扩大首先加剧管壁连续性削弱和孔缘应力集中。当缺陷进一步

增大后，孔缘曲率减小，使局部峰值应力出现一定程度的缓解。

修复后，不同穿孔半径下最大应力较修复前分别降低 25.9%、37.8%、43.3%和 44.6%，且随着穿孔半径增大，CIPP 的应力削减效果总体增强。这是由于缺陷扩大后钢管局部承载能力进一步降低，更多荷载转移至跨越缺陷的 CIPP 内衬，使其对缺陷边缘应力集中具有更明显的分担作用。

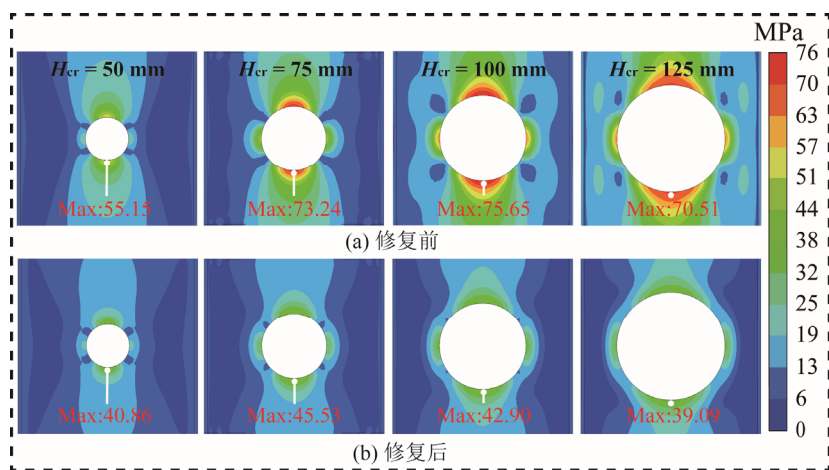


图 12 不同穿孔半径下 CIPP 修复前后穿孔钢管内壁应力云图

Fig.12 Stress contours of the inner wall of the perforated steel pipe before and after CIPP rehabilitation with different perforation radii

图 13 给出了不同穿孔半径下钢管穿孔内外边界的 Von Mises 应力分布。修复前，外边界峰值由约 13 MPa 增至 47 MPa，增幅超过 260%；内边界峰值则呈先增大后降低的变化规律，并在半径 100 mm 时达到最大值。相比之下，修复后外边界峰值

由约 15 MPa 增至 23 MPa，内边界峰值均低于修复前对应工况，且大尺寸穿孔下应力波动明显减小。说明缺陷尺寸是影响修复结构荷载分配的重要因素，随着穿孔扩大，CIPP 跨越承载作用增强，但钢管孔缘仍承担较大的局部应力。

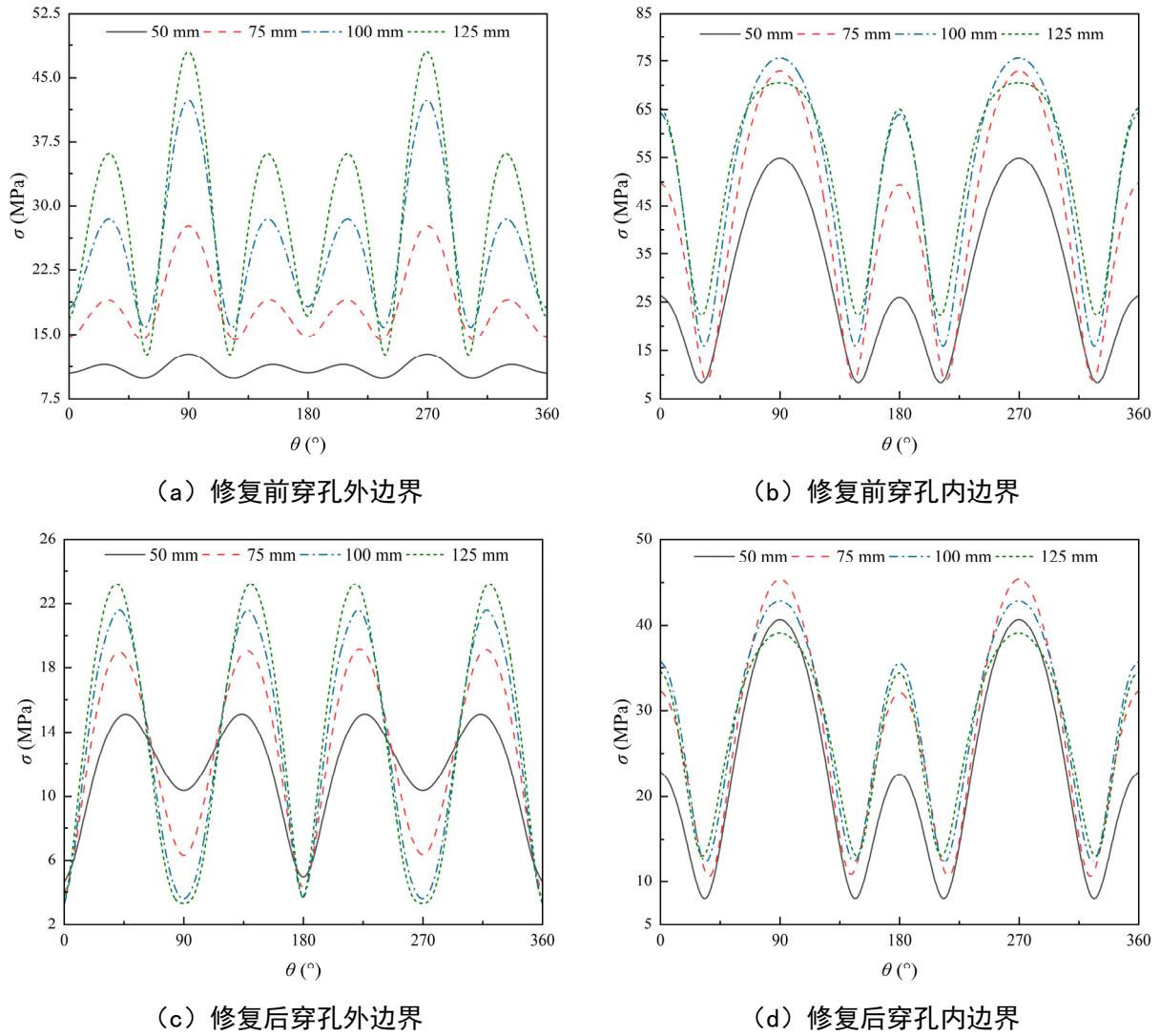


图 13 不同穿孔半径下 CIPP 修复前后钢管穿孔内外边界应力

Fig.13 Stress distributions along the inner and outer boundaries of the perforation before and after CIPP rehabilitation with different perforation radii

3.4 CIPP 厚度影响

不同 CIPP 厚度下修复前后穿孔钢管内壁应力云图如图 14 所示。修复前，钢管内壁高应力主要集中在穿孔上下边缘，最大应力达到 73.24 MPa。CIPP 修复后，高应力区域明显减小，表明内衬能够有效分担缺陷区域荷载并缓解局部应力集中。随

着 CIPP 厚度由 4 mm 增加至 10 mm，钢管内壁最大应力分别较修复前降低 37.8%、33.5%、31.5%和 31.5%，整体变化幅度较小，表明在本文参数范围内，单纯增加 CIPP 厚度对进一步降低钢管缺陷边缘峰值应力的作用相对有限。

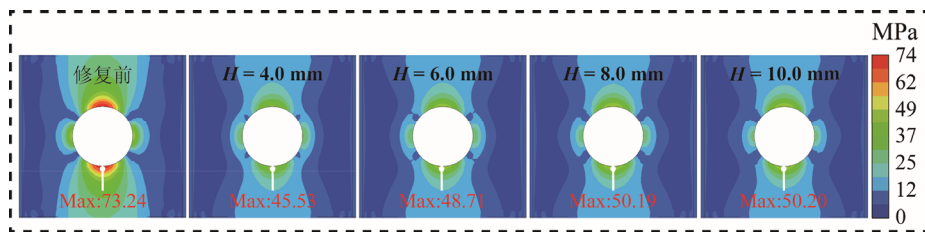


图 14 不同 CIPP 厚度下修复前后穿孔钢管内壁应力云图

Fig.14 Stress contours of the inner wall of the perforated steel pipe before and after CIPP rehabilitation with different CIPP thicknesses

不同 CIPP 厚度下穿孔内外边界 Von Mises 应力分布如图 15 所示。修复前，内、外边界应力峰

值分别为 73.24 MPa 和 27.95 MPa，均主要分布于 90°和 270°附近。修复后，穿孔边界峰值应力整体得到降低，其中外边界峰值较修复前分别降低 31.2%、22.8%、16.6%和 18.3%，内边界峰值分别降低 37.8%、33.5%、31.5%和 31.5%。随着 CIPP 厚度增加，钢管内外边界峰值应力略有升高或趋于稳定，但应力曲线波动幅度有所减小，表明缺陷区域

的应力分布逐渐趋于平缓。这是因为 CIPP 厚度增加后，内衬刚度和承载能力提高，可分担更多荷载，但钢管孔缘局部应力主要受缺陷几何形态控制，继续增厚对其改善作用有限，部分荷载还会向孔缘周围管壁重新分配。因此，CIPP 厚度应结合缺陷规模 and 结构受力特征确定。

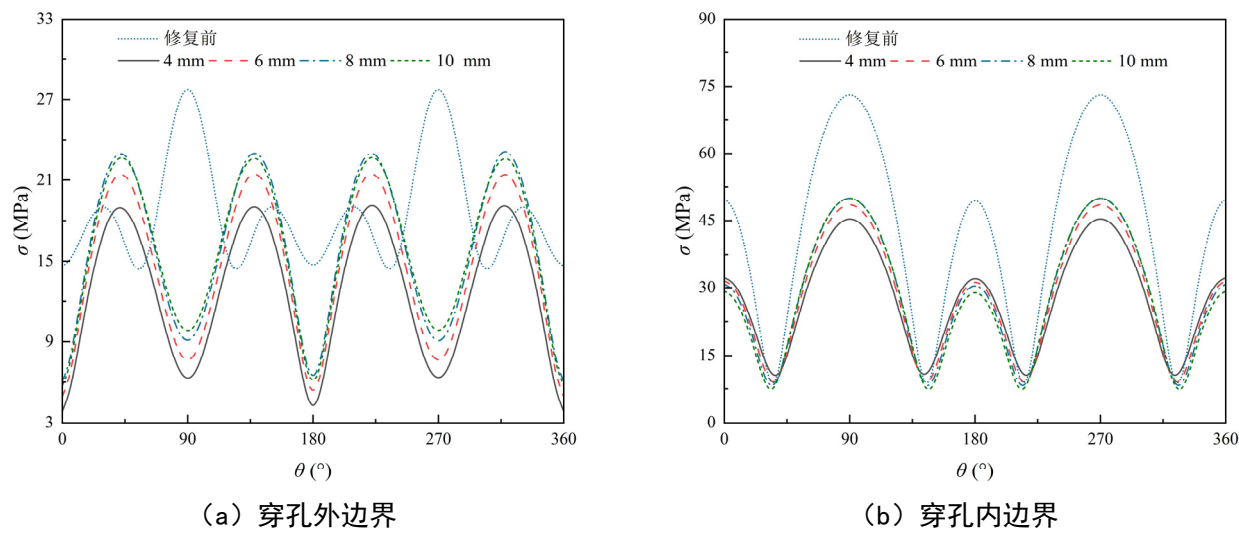


图 15 不同 CIPP 厚度下修复前后钢管穿孔内外边界应力

Fig.15 Stress distributions along the inner and outer boundaries of the perforation before and after CIPP rehabilitation with different CIPP thicknesses

3.5 CIPP 弹性模量影响

不同 CIPP 弹性模量下修复前后穿孔钢管内壁应力云图如图 16 所示。随着 CIPP 弹性模量由 900 MPa 增大至 3900 MPa，钢管内壁最大应力较修复前分别

降低 36.5%、37.8%、39.1%和 40.4%，最大应力仅下降约 6.1%，表明提高 CIPP 弹性模量能够改善钢管缺陷区域受力，但影响幅度相对有限。

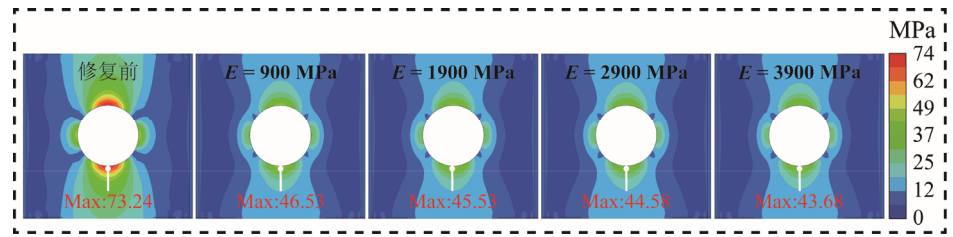
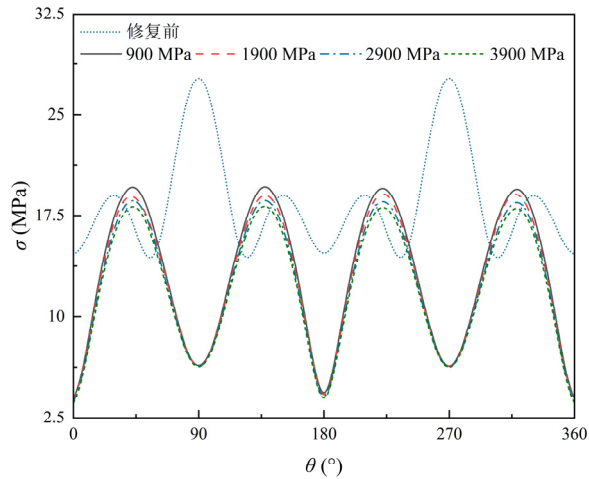


图 16 不同 CIPP 弹性模量下修复前后穿孔钢管内壁应力云图

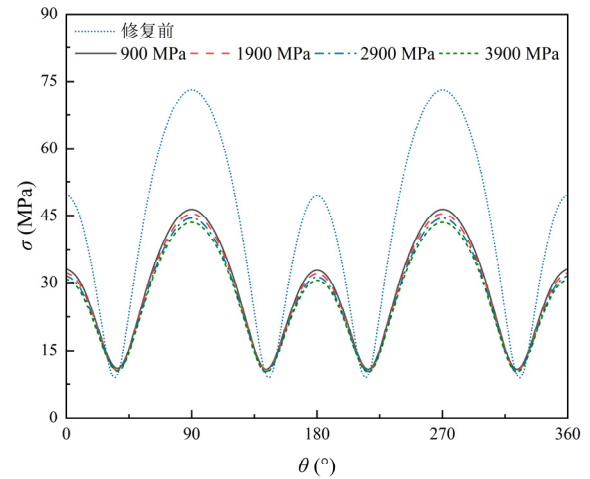
Fig.16 Stress contours of the inner wall of the perforated steel pipe before and after CIPP rehabilitation with different CIPP elastic moduli

图 17 给出了不同弹性模量下钢管穿孔内外边界的 Von Mises 应力分布。随着弹性模量增大，外边界峰值由 19.74 MPa 降至 18.27 MPa，内边界峰值由 46.53 MPa 降至 43.68 MPa，降幅分别约 7.4%和 6.1%，

应力分布形态基本保持一致。说明弹性模量变化主要影响钢管与 CIPP 之间的荷载分配比例，而未改变穿孔区域的基本受力模式，其对应力水平的影响弱于管径、穿孔半径和 CIPP 厚度。



(a) 穿孔外边界



(b) 穿孔内边界

图 17 不同 CIPP 弹性模量下修复前后钢管穿孔内外边界应力

Fig.17 Stress distributions along the inner and outer boundaries of the perforation before and after CIPP rehabilitation with different CIPP elastic moduli

4 结论

通过内外压作用下 CIPP 修复穿孔腐蚀钢管力学承载试验,建立了考虑界面粘结作用的 CIPP-腐蚀钢管复合结构三维有限元模型,分析了外压、管径、穿孔半径、CIPP 厚度及弹性模量等因素对复合结构承载性能的影响,得到以下结论:

1) 未修复穿孔钢管在内外压共同作用下,应力主要集中于穿孔边缘,90°和 270°方向为主要应力集中区域。CIPP 修复后,钢管与内衬形成协同承载体系,应力集中明显缓解,钢管最大应力降低 12.1%~50.0%,表明 CIPP 能够有效改善穿孔区域受力状态。

2) 外压对复合结构受力特性具有显著影响。随着外压由 0.05 MPa 增大至 0.35 MPa,修复后钢管内壁最大应力由 37.13 MPa 增至 62.47 MPa;同时,外压增大使内衬受力趋于均匀,并增强钢管与 CIPP 之间的协同作用。

3) 管径、穿孔半径及 CIPP 参数均对复合结构承载性能产生影响。管径增大使缺陷边缘应力增加,修复效果减弱;穿孔半径增大后,CIPP 承担更多跨越缺陷区域的荷载。增加 CIPP 厚度可显著降低内衬应力,而提高弹性模量对钢管应力的改善作用有限,表现出一定的边际效应。

4) 综合分析表明,缺陷尺寸和 CIPP 厚度是影响修复效果的重要因素,工程应用中应结合缺陷规模合理确定内衬参数,并兼顾结构安全与修复经济性。需要指出的是,本文研究主要针对单一圆形穿孔缺陷,对于纵向腐蚀、非规则腐蚀坑及多孔缺陷等复杂腐蚀形态的适用性仍需结合实际缺陷特征

进一步验证。

参 考 文 献

- [1] 胡玲,乔庆.基于多源监测数据的长期服役供水钢管结构安全评估[J].给水排水,2024,60(增刊 1):306-316.[Hu Ling, Qiao Qing.Structural safety assessment of long-service water supply steel pipes based on multi-source monitoring data[J].Water & Wastewater Engineering,2024,60(S1): 306-316.]
- [2] 黄耀华,李素贞.饱和土中埋地管道泄漏管壁声波波速计算方法[J/OL].工程力学,2026-07-07.<https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20260130.0933.006>. [Huang Yaohua, Li Suzhen.Calculation method of acoustic wave velocity in leaking buried pipelines in saturated soil[J/OL].Engineering Mechanics,2026-07-07.<https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20260130.0933.006>.]
- [3] 姜玥,陈劲阳,吴文娟,等.交通荷载作用下管土力学响应试验研究[J].激光与光电子学进展,2026-07-07.<https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN.20260622.1425.082>. [Jiang Yue, Chen Jinyang, Wu Wenjuan, et al.Experimental study on pipe-soil mechanical response under traffic loading [J/OL].Laser & Optoelectronics Progress,2026-07-07. <https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN.20260622.1425.082>.]
- [4] 武一奇.给水排水管道非开挖修复标准体系研究[J].给水排水,2026,62(4):155-160.[Wu Yiqi.Research on the standard system of trenchless rehabilitation for water supply and drainage pipelines[J].Water & Wastewater Engineering,2026,62(4):155-160.]
- [5] 郝技.非开挖修复技术在市政供水管网改造中的应用[J].中国给水排水,2025,41(14):101-106.[Hao Ji.Application of

- trenchless rehabilitation technology in municipal water supply pipeline renovation[J].China Water & Wastewater, 2025,41(14):101-106.]
- [6] 杨寅昌,黄志伟,全学友,等.地下管线非开挖修复技术国内外应用现状[J].地下空间与工程学报,2024,20(增刊 2): 1021-1027.[Yang Yinchang,Huang Zhiwei,Quan Xueyou,et al.Application status of trenchless rehabilitation technology for underground pipelines at home and abroad[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2024, 20(S2):1021-1027.]
- [7] 徐静.CIPP 常温固化技术的经济性和适用性探讨[J].给水排水,2022,58(增刊 1):996-998.[Xu Jing.Discussion on the economy and applicability of ambient-temperature cured CIPP technology[J].Water & Wastewater Engineering, 2022,58(S1):996-998.]
- [8] 石东优,张军,李静,等.城镇排水管道 CIPP 紫外光固化修复技术工程应用[J].给水排水,2024,60(02): 113-120,126.[Shi Dongyou,Zhang Jun,Li Jing,et al.Engineering application of ultraviolet-cured CIPP technology for urban drainage pipelines[J].Water & Wastewater Engineering,2024,60(2):113-120,126.]
- [9] 向维刚,马保松,赵雅宏.给排水管道非开挖 CIPP 修复技术研究综述[J].中国给水排水,2020,36(20):1-9.[Xiang Weigang,Ma Baosong,Zhao Yahong.Review on trenchless CIPP rehabilitation technology for water supply and drainage pipelines[J].China Water & Wastewater,2020, 36(20):1-9.]
- [10] 顾卫东.常用城镇供水管道非开挖整体修复工艺的分析比较及展望[J].城镇供水,2022(5):61-64,91.[Gu Weidong.Analysis,comparison and prospect of trenchless rehabilitation technologies for urban water supply pipelines[J].Urban Water Supply,2022(5):61-64,91.]
- [11] 罗智程.给水管道不锈钢内衬非开挖修复技术研究与应用[J].中国给水排水,2021,37(16):102-107.[Luo Zhicheng. Research and application of trenchless stainless-steel lining technology for water supply pipelines[J].China Water & Wastewater,2021,37(16):102-107.]
- [12] 张叮叮.给水大口径钢管穿插刚性管长距修复应用案例分析[J].中国给水排水,2020,36(16):121-125.[Zhang Dingding.Case analysis of long-distance rehabilitation of large-diameter water supply steel pipelines by sliplining with rigid pipes[J].China Water & Wastewater,2020, 36(16):121-125.]
- [13] Zhang Xijun,Fang Hongyuan,Hu Qunfang,et al.Mechanical performance of corroded reinforced concrete pipelines rehabilitated with sprayed-on cementitious liners subjected to combined loads[J].Tunnelling and Underground Space Technology, 2021,104266.
- [14] Zhu He,Wang Tianyu,Wang Yichao,et al.Trenchless rehabilitation for concrete pipelines of water infrastructure:A review from the structural perspective[J].Cement and Concrete Composites,2021,104193.
- [15] Wang Peijie,Yu Hengjing,Jing Wenlin,et al.Research progress on the curing process and degree-of-cure monitoring techniques of UV-CIPP resin-based composites [J].Sensors and Actuators: A Physical,2026,405:117772.
- [16] Xing Wenjing,Zhang Chao,Xia Yangyang,et al.Trenchless rehabilitation materials and technologies for water supply pipes:A comprehensive review[J].Process Safety and Environmental Protection,2025,203:107896.
- [17] 夏洋洋,方宏远,张超,等.玻纤增强甲基丙烯酸酯基 UV-CIPP 材料抗弯性能及失效分析[J].材料导报,2024,38(12):294-300.[Xia Yangyang,Fang Hongyuan, Zhang Chao,et al.Flexural properties and failure analysis of glass fiber reinforced methacrylate-based UV-CIPP materials[J].Materials Reports,2024,38(12):294-300.]
- [18] 方宏远,初佳军,李斌,等.CIPP 修复腐蚀与脱节钢筋混凝土管道的接头力学行为[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2025,58(8):834-850.[Fang Hongyuan,Chu Jiajun,Li Bin,et al.Mechanical behavior of joints in CIPP-rehabilitated corroded and dislocated reinforced concrete pipes[J].Journal of Tianjin University (Science and Technology),2025,58(8):834-850.]
- [19] 吴志俊,林宇,郑志会,等.腐蚀程度对混凝土排水管道 CIPP 修复前后力学性能影响分析[J].给水排水,2022,58(增刊 1): 1004-1009.[Wu Zhijun,Lin Yu,Zheng Zhihui,et al.Analysis of the influence of corrosion degree on the mechanical properties of concrete drainage pipes before and after CIPP rehabilitation[J].Water & Wastewater Engineering,2022, 58(S1):1004-1009.]
- [20] Seyed M Y,Kalyan R P.Seismic Performance assessment of cured-in-place-pipe lined cast iron pipes[J].Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice,2026,17(3): 04026037.
- [21] Liu Jing,Du Wenwen,Ma Chang,et al.Load-bearing performance of corroded reinforced concrete pipes rehabilitated with CIPP liners:Full-scale tests and a design-oriented bearing capacity model[J].Construction and Building Materials,2026,528:146485.
- [22] 窦铁生,董晓农,章焯,等.PCCP 断丝破坏规律I:原型试验研究[J].水利学报,2023,54(12):1430-1439.[Dou Tiesheng, Dong Xiaonong,Zhang Xuan,et al.Failure mechanism of

- prestressed concrete cylinder pipe with broken wires I:Prototype experimental study[J].Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(12):1430-1439.
- [23] Liu Jing,Cao Jingguo,Ma Chang,et al.Failure mechanisms and structural response of CIPP-Rehabilitated concrete pipes under external loads[J].Engineering Failure Analysis,2026, 186 (PB):110563.
- [24] Wang Xuehao,Yan Xuefeng,Ariaratnam S T,et al.Investigation on the load-bearing performance and interface stress of plastic pipe-CIPP liner composite structures[J].Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research,2026,168(P1):107160.
- [25] Yang Yulin,Chen Yuhao,Zhang Shiyu,et al.Fatigue resilience and life prediction of corroded and voided concrete pipes with CIPP-polymer composite rehabilitation under traffic load and groundwater[J].Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research,2026,178108021.
- [26] GB 50268—2008 给水排水管道工程施工及验收规范[S].
- [27] Li Pengju,Li Bin,Fang Hongyuan,et al.Pressure-bearing responses of CIPP-lined corroded water-supply steel pipes considering interface bonding behavior[J].Engineering Failure Analysis,2026,194:110965.

Bearing Characteristics of CIPP-Lined Corroded Perforated Water Supply Steel Pipes under Combined Internal and External Pressure

Xu Junsong¹, Li Bin², Li Pengju², Zhang Jiajia¹

- (1. The Second Construction Co., Ltd. of China Construction Seventh Engineering Division, Kunshan 215310, China;
2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: **【Objective】** The mechanical bearing behavior of perforated corroded water supply steel pipes rehabilitated with Cured-in-Place Pipe (CIPP) under combined internal and external pressures was investigated through full-scale experiments and finite element analysis. **【Methods】** Full-scale mechanical loading tests were carried out on CIPP-repaired corroded steel pipes. A three-dimensional finite element model considering the bonding behavior at the steel pipe–liner interface was established and validated using the experimental results. The effects of external pressure, pipe diameter, perforation radius, CIPP thickness, and elastic modulus on the stress response of the composite structure were then investigated. **【Results】** The results show that CIPP rehabilitation effectively alleviates stress concentration around the perforation and enables cooperative load bearing between the steel pipe and the liner. Within the investigated range, increasing the external pressure enhanced the deformation compatibility between the steel pipe and the liner, while the maximum stress reduction of the steel pipe decreased from 50.0% to 12.1%. As the pipe diameter increased, the maximum stress reduction decreased from 42.4% to 23.7%, indicating a weakened rehabilitation effect. In contrast, increasing the perforation radius enabled the liner to carry more bridging load, and the maximum stress reduction increased from 25.9% to 44.6%. Increasing the CIPP thickness effectively reduced the stress level in the liner, whereas increasing the elastic modulus provided only limited improvement in the stress state of the steel pipe. **【Conclusion】** The results provide a theoretical basis for the structural design and engineering application of CIPP rehabilitation for corroded water supply steel pipes. **Keywords:** corroded steel pipe; perforation defect; CIPP rehabilitation; combined internal and external pressure; mechanical bearing characteristics; FE analysis