

引文格式:黄宣凯,廖飞宇,王献挚,等.坑槽腐蚀对钢管混凝土侧向冲击性能的影响研究[J].建筑科学与工程学报,2025,42(4):31-42.
HUANG Xuankai, LIAO Feiyu, WANG Xianzhi, et al. Study on effect of pitting corrosion on behavior of concrete-filled steel tube under lateral impact[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(4): 31-42.

DOI:10.19815/j.jace.2023.12006

坑槽腐蚀对钢管混凝土侧向冲击性能的影响研究

黄宣凯¹,廖飞宇¹,王献挚¹,陈宇峰²

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院,福建 福州 350108; 2. 福建建工集团有限责任公司,福建 福州 350003)

摘要:为研究侧向冲击荷载作用下坑槽腐蚀对钢管混凝土力学性能的影响,建立了考虑坑槽腐蚀后的圆钢管混凝土构件有限元模型,并完成了4根考虑坑槽腐蚀缺陷的圆钢管混凝土柱落锤侧向冲击试验,利用试验数据验证了有限元模型的可靠性。通过有限元模型对侧向冲击荷载作用下带坑槽腐蚀的钢管混凝土柱工作机理进行了研究,并分析了坑槽深度、坑槽个数、坑槽分布、腐蚀体积损失度和冲击速度等因素对钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响规律。结果表明:坑槽腐蚀不仅使钢管更容易发生局部屈曲,而且削弱了钢管和混凝土之间的相互作用,使构件的抗冲击性能降低;随着坑槽深度、个数及腐蚀体积损失度的增大,构件的冲击持续时间会相应增加,而冲击力峰值、冲击力平台值会随之下降;在相同腐蚀体积损失度下,坑槽个数对钢管混凝土柱抗侧向冲击性能衰退的影响比坑槽深度更为显著,而坑槽不均匀分布情况相比于均匀分布情况会对钢管混凝土抗侧向冲击性能产生更不利的影响。

关键词:钢管混凝土;坑槽腐蚀;侧向冲击;有限元模型;参数分析

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)04-0031-12

Study on effect of pitting corrosion on behavior of concrete-filled steel tube under lateral impact

HUANG Xuankai¹, LIAO Feiyu², WANG Xianzhi¹, CHEN Yufeng²

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. Fujian Construction Engineering Group Co., Ltd., Fuzhou 350003, Fujian, China)

Abstract: In order to study the effect of pitting corrosion on the mechanical behavior of concrete-filled steel tube (CFST) under lateral impact loads, a finite element model of circular CFST considering pitting corrosion was established. The tests of four circular CFST specimens considering pitting corrosion defects subjected to lateral impact using a falling hammer were carried out, and the reliability of finite element model was verified using experimental data. The working mechanism of CFST columns with pitting corrosion under lateral impact loads was studied using finite element models. The influence of factors such as pit depth, number of pits, pit distribution, corrosion volume loss, and impact velocity on the lateral impact resistance of CFST columns was investigated. The results show that pitting corrosion not only makes steel pipes more prone to local buckling, but also weakens the interaction between steel pipe and

concrete, resulting in a decrease in the impact resistance of components. With the increase of pit depth, number of pits, and corrosion volume loss, the impact duration of component will correspondingly increase, while the peak and plateau values of impact force will decrease accordingly. Under the same corrosion volume loss, the number of pits has a more significant impact on the lateral impact resistance of CFST columns than the pit depth. The non-uniform distribution of pits has more adverse effect on the lateral impact resistance of CFST compared to the uniform distribution.

Key words: concrete-filled steel tube; pitting corrosion; lateral impact; finite element model; parametric analysis

Author resume: LIAO Feiyu(1978-), male, PhD, professor, E-mail: feiyu.liao@fafu.edu.cn.

0 引言

钢管混凝土结构具有承载力高、施工便捷和抗冲击性能强等优点,被广泛应用于桥梁结构、高耸结构、大跨空间结构等建筑结构中^[1]。在海洋环境下,钢管混凝土结构在服役过程中易遭受氯离子腐蚀,从而对结构安全性造成影响。依据韩恩厚等^[2]的研究,钢管表面均匀腐蚀指的是腐蚀破坏均匀地发生在整个金属表面上,会造成钢结构的总强度下降,而坑槽腐蚀主要指的是金属表面个别部位快速腐蚀,从而出现坑槽的腐蚀形态。虽然《工业建筑防腐蚀设计标准》^[3]将坑槽腐蚀用全截面均匀腐蚀替代以实现简化计算,然而坑槽腐蚀会使钢管表面产生应力集中,对其承载能力有更不利的影响。为此,国内外研究者针对坑槽腐蚀对钢管混凝土构件承载能力的影响进行了相关研究。王仁华等^[4]构建带随机点状坑槽腐蚀钢板的有限元数值模型,研究了不同长细比和腐蚀强度的钢板极限强度退化规律;Wang等^[5]对具有人工点状坑槽腐蚀的管状构件进行了抗压试验,并使用 ANSYS 软件进行数值模拟;杨明飞等^[6]进行带局部损伤的钢柱组和一个无损伤对照组试验,探究不同程度的腐蚀对钢柱承载能力的影响;廖栩等^[7]建立带局部腐蚀的方中空夹层钢管混凝土轴压有限元数值模型;Li 等^[8]建立基于生命周期的 FRP 加固坑槽腐蚀钢管混凝土(CFST)柱的有限元模型。上述研究表明,点状坑槽腐蚀会导致钢管表面出现应力集中现象,使其更易发生局部屈曲。同时,腐蚀导致钢管壁厚减小,对混凝土的约束作用降低,影响了结构的稳定性和力学性能,使其更容易发生疲劳或破坏。

在服役过程中,钢管混凝土柱或桥墩也可能遭遇撞击荷载,如车辆撞击、恐怖袭击和爆炸等。为探究钢管混凝土结构在冲击荷载下的动力响应,学者

们开展了相关研究。侯川川^[9]为研究冲击荷载下的钢管及钢管混凝土柱动力学响应,设计了 12 组落锤冲击试验,并利用有限元软件进行数值模拟;Wang 等^[10]以不同壁厚为变量,对钢管混凝土试件开展冲击试验;Han 等^[11]对钢管混凝土试件开展侧向冲击试验和有限元数值模拟,并提出钢管混凝土动力抗弯承载力的简化计算公式;Hou 等^[12]利用有限元软件分析预加轴力和侧向冲击耦合作用下钢管混凝土结构的抗冲击性能;康昌敏等^[13]利用有限元软件比较不同轴压比对钢管混凝土抗侧向冲击性能的影响。上述研究表明,冲击作用有着冲击时间短、释放能量高、对结构破坏大等特点。

通过上述分析可知,坑槽腐蚀和撞击都将导致钢管混凝土结构损伤,然而目前坑槽腐蚀对钢管混凝土抗侧向冲击性能的影响尚不明确。为此,本文建立了带坑槽腐蚀的圆钢管混凝土柱在侧向冲击作用下的有限元模型,并完成了 4 根带坑槽腐蚀的圆钢管混凝土柱的侧向冲击试验,利用试验结果验证了有限元模型。在此基础上,对坑槽腐蚀钢管混凝土构件在侧向冲击作用下的工作机理进行剖析,并以坑槽深度(d)、坑槽个数(N)、坑槽分布、腐蚀体积损失度(D_V)和冲击速度(V_0)等参数为变量,对圆钢管混凝土柱的侧向冲击性能进行计算分析。本文研究结果可为在役钢管混凝土结构的冲击性能评估和工程设计提供参考。

1 有限元模型

1.1 材料本构模型

钢材本构模型采用弹塑性模型,该模型采用 Von Mises 屈服准则,并考虑了钢材的包辛格效应^[14]。有限元模型中钢材的弹性模量 E_s 取 206×10^3 MPa,泊松比 γ_s 取 0.3。钢材的应力-应变关系模型采用韩林海^[1]推荐的二次塑流模型。

钢材性能易受应变率影响,在高应变率下钢材的屈服强度会比静力条件下有所提高。本文使用 Cowper-Symonds 模型^[15]对钢材本构进行修正[式(1)]。

$$\frac{f_{yd}}{f_y} = 1 + \left(\frac{\epsilon^p}{D}\right)^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

式中: ϵ^p 为钢材的应变率; f_{yd} 为应变率达到 ϵ^p 时对应的钢材屈服强度; f_y 为受静力荷载时的钢材屈服强度; D 、 p 分别为材料类型和应变强化参数,参考文献[16]取 $D=6\ 844\ \text{s}^{-1}$, $p=3.91$ 。

采用文献[14]建议的混凝土塑性损伤模型(CDP)来模拟混凝土的塑性行为。混凝土单轴受压应力-应变关系采用韩林海^[1]提供的考虑钢管约束效应的本构模型,其被动约束状态由约束效应系数 ξ 描述,即 $\xi=f_y A_s/(f_{ck} A_c)$, A_s 和 A_c 分别为钢管和混凝土截面面积, f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值。混凝土受拉开裂强度采用 Han 等^[14]提供的公式计算。混凝土在高应变率下表现出与静力下不同的力学性能^[17],目前已有许多针对高应变率下的混凝土强度计算模型,其中最具代表性的是欧洲混凝土规范 CEB-FIP 推荐的混凝土本构关系^[18],在高应变率条件下的混凝土受压本构表达式为

$$f_d/f_c = \begin{cases} (\epsilon_d/\epsilon_s)^{1.026\alpha} & \epsilon_d < 30\ \text{s}^{-1} \\ \gamma(\epsilon_d/\epsilon_s)^{1/3} & \epsilon_d \geq 30\ \text{s}^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_d 为受动力荷载时的混凝土抗压强度; f_c 为受静力荷载时的混凝土抗压强度; ϵ_d 为受动力荷载时的应变率; ϵ_s 为受静力荷载时的应变率;参数 α 和 γ 依据规范 CEB-FIP 取值。

应变率效应下的混凝土受拉本构表达式为

$$f_{td}/f_{ts} = \begin{cases} (\epsilon_d/\epsilon_s)^{1.016\delta} & \epsilon_d < 30\ \text{s}^{-1} \\ \beta(\epsilon_d/\epsilon_s)^{1/3} & \epsilon_d \geq 30\ \text{s}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_{td} 为受动力荷载时的混凝土抗拉强度; f_{ts} 为受静力荷载时的混凝土抗拉强度;参数 δ 和 β 依据 CEB-FIP 规范取值^[18]。

1.2 网格划分、界面处理、边界条件

使用 ABAQUS/Explicit 显式动力学模块建立带坑槽腐蚀的圆钢管混凝土柱在侧向冲击荷载下的数值分析模型,模型由带坑槽腐蚀的钢管、核心混凝土、落锤、端板组成。其中,钢管、核心混凝土和端板的单元类型均采用八节点减缩积分的六面体实体单元(C3D8R)^[19],并将落锤定义为解析刚体。

为方便与试验结果进行对比,根据试验构件的坑槽参数,建立带坑槽腐蚀的有限元模型。通过在有限元模型的钢管表面布置相应的圆柱体(直径为

6 mm,深度为 2 mm),使用合并/切割实体工具,将圆柱体作为切削物对钢管进行切割,以此得到带坑槽腐蚀的钢管。网格密度对 Explicit 显式动力学模块的精度和计算耗时影响较大,本文模型在跨中受落锤冲击作用,因此需对跨中冲击区域进行网格加密。由于坑槽易产生应力集中,所以也需对坑槽周围进行网格加密,保证以上区域的网格密度是未受冲击区域的 2 倍;在划分网格前先使用扫掠的方式拆分几何,将坑槽的网格属性指派为六面体结构,保证坑槽周围网格质量。

落锤与钢管、钢管与核心混凝土、核心混凝土与端板的接触类型均选用“表面接触”;钢管与端板之间使用“绑定”进行约束;钢管与核心混凝土的切向接触采用“罚摩擦”,摩擦因数选取文献[20]的建议值 0.6,法向接触选用“硬接触”。模型端部的一端完全固定,约束所有自由度,另一端约束所有转动自由度以及两个侧向平动自由度,保持试件可轴向平动,通过弹簧单元施加轴力。将落锤放置在试件跨中上方 10 mm 处,给予落锤一定的质量和初速度,以此模拟落锤对构件施加侧向冲击荷载,有限元模型示意如图 1 所示。坑槽腐蚀钢管表面示意图如图 2 所示。

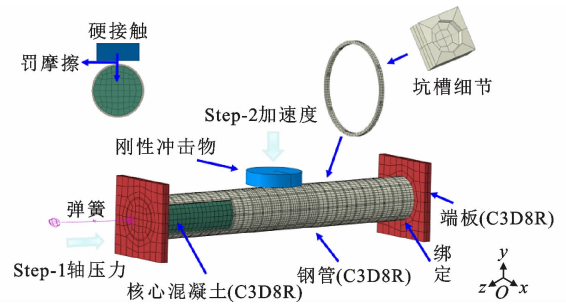


图 1 带坑槽腐蚀的钢管混凝土有限元模型

Fig. 1 Finite element model of CFST with pitting corrosion

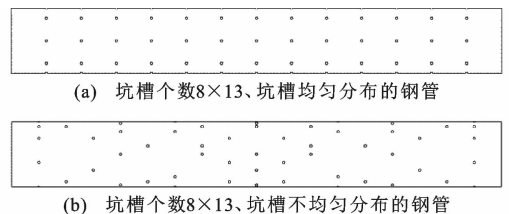


图 2 坑槽腐蚀钢管表面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of steel tube surface with pitting corrosion

钢管混凝土构件在实际工程中遭受冲击作用时,会受到冲击力和轴力的耦合作用,因此本文模型采用轴力-冲击力耦合加载模型^[21],并且将模型模

拟过程分为两个部分：①在有限元中采用 ABAQUS/Standard 模块对试件施加相当于极限承载力 0.3 倍的轴力，此时模型采用静力学本构，为保证轴力在冲击过程中不消失，轴力通过弹簧单元施加，并将计算结果写入 Restart 文件中；②在有限元中采用 ABAQUS/Explicit 模块对试件施加侧向冲击力，模型重新采用考虑应变率效应的动力学本构，通过设置初始状态将 Restart 文件的静力计算结果导入动力学模块，然后为落锤设置一定的初速度，以此在试件跨中施加冲击力。

2 侧向冲击试验

2.1 试件设计

为考察坑槽腐蚀对构件力学性能的影响，设计了 4 根不同坑槽腐蚀情况的圆钢管混凝土柱构件，并开展落锤侧向冲击试验。韩恩厚等^[2]的研究表明，海洋工程中钢管混凝土柱的腐蚀损伤模式主要为浪花飞溅等因素引起的点蚀坑槽损伤，且钢材在浪花飞溅区的点蚀坑槽平均深度在 2 年内就可达 2 mm。Nakai 等^[22]通过大量观测发现海洋工程中钢材表面的腐蚀坑槽径深比通常在 3:1~6:1 之间，坑槽形状主要为圆柱、圆锥和球冠状等。圆柱体坑槽被广泛应用于海洋工程结构的试验和数值模拟

中^[4]。因此，本文研究中选取直径为 6 mm、深度为 2 mm 的圆柱体坑槽作为典型构件的坑槽腐蚀模式，通过机械钻孔的方式进行试件加工，从而近似模拟海洋环境中钢管混凝土柱构件的腐蚀损伤程度。由于在实际工程中，浪花飞溅区的钢管混凝土柱通常会出现点状分布的坑槽腐蚀，并存在坑槽布满钢管的可能。秦静远^[23]研究表明，在相同腐蚀程度下，坑槽的分布形式对结构的力学性能影响较小。因此，本文研究中试件的坑槽腐蚀分布形式选取为通长均匀分布的形式。

综上，共设计 4 根圆钢管混凝土柱构件，所有试件长度均为 1 260 mm，截面直径为 168 mm，钢管壁厚为 5 mm，端板尺寸为 440 mm×340 mm×20 mm。钢管采用 Q235 直缝钢管，钢材各项力学性能指标见表 1。

钢管内浇筑的自密实混凝土等级为 C60，混凝土各项力学性能指标见表 2。试验主要参数如表 3 所示，试件编号中 C 代表钢管混凝土试件，第一个数字 0、2、4 分别代表无坑槽腐蚀、坑槽深度 $d=2$ mm 和坑槽深度 $d=4$ mm 的试件；第二个数字 0、3、6 分别代表无坑槽腐蚀、坑槽个数 $N=8\times 13$ 和坑槽个数 $N=8\times 26$ 的试件，如 C2-3 代表坑槽深度 $d=2$ mm、坑槽个数 $N=8\times 13$ 的试件。

表 1 钢材力学性能指标

Table 1 Mechanical behavior indexes of steel

钢材等级	屈服强度 f_y /MPa	屈服应变 $\epsilon_y/\mu\epsilon$	极限强度 f_u /MPa	弹性模量 E_s /MPa	泊松比 ν	延伸率 $\delta/\%$
Q235	298.6	2 124.8	375.6	205 220.0	0.3	21.3

表 2 混凝土力学性能指标

Table 2 Mechanical behavior indexes of concrete

混凝土等级	坍落度/mm	扩展度/mm	28 d 抗压强度 $f_{cu/28}$ /MPa	试验时抗压强度 $f_{cu/t}$ /MPa	弹性模量 E_c /MPa	泊松比 ν_c
C60	268.0	542.0	65.8	68.3	33 235.5	0.2

表 3 试件信息

Table 3 Specimen information

试件编号	D /mm	L /mm	t /mm	d /mm	N	V_0 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	M /kg	E_k /kJ	n
C0-0	168	1 260	5	0	0	9	530	21.5	0.3
C2-3	168	1 260	5	2	8×13	9	530	21.5	0.3
C4-3	168	1 260	5	4	8×13	9	530	21.5	0.3
C2-6	168	1 260	5	2	8×26	9	530	21.5	0.3

注： D 为钢管截面外径； L 为试件长度； t 为钢管壁厚； d 为坑槽深度； N 为坑槽个数； V_0 为落锤与钢管表面接触时的瞬时速度； M 为落锤质量； E_k 为冲击能量； n 为轴压比。

2.2 试验装置

试验装置如图 3 所示，试件固定在两侧支座之间，试验基座包括一个固定基座和一个滑动基座，其中固定基座与地基相连，滑动基座仅可以平行滑动。落锤安装在固定且光洁的滑轨内，其质量为 530

kg，圆形锤头半径为 110 mm，可通过调整落锤高度 H 来改变冲击能量。为保持加载期间轴力恒定，通过弹簧反力系统为试件施加轴压力。试验过程中，冲击力由落锤内部反力系统以 100×10^4 次 $\cdot\text{s}^{-1}$ 的频率采集；试件冲击过程采用触发式高速摄像机

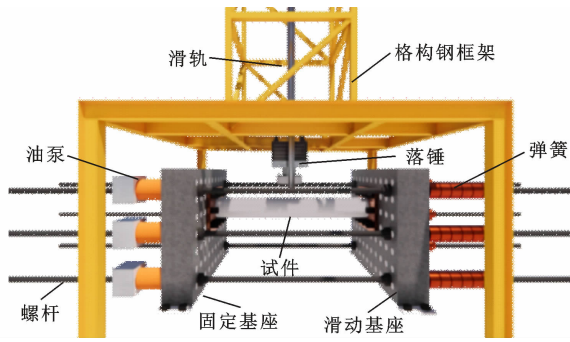


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test device

记录。

2.3 模型验证

为了验证模型的适用性,将有限元计算结果与本文试验结果进行比较,并且选用了侯川川等^[9,24-25]相关文献中的钢管混凝土侧向冲击试验进行验证。

图 4 为本文试验破坏模式和有限元计算破坏模式的对比。由图 4 可见,试验和有限元计算的破坏模式基本一致,在冲击荷载作用下试件均出现整体的弯曲变形和跨中冲击区域的局部内凹变形,同时试件两端底部的外钢管均出现向外鼓屈。图 5 为试验冲击力-时间曲线与有限元计算结果的对比。由图 5 可见,试验和有限元计算的冲击力-时间曲线均经历了峰值段、平台段、下降段、零值段 4 个阶段,并且冲击力峰值、冲击力平台值和冲击持续时间均吻合良好。

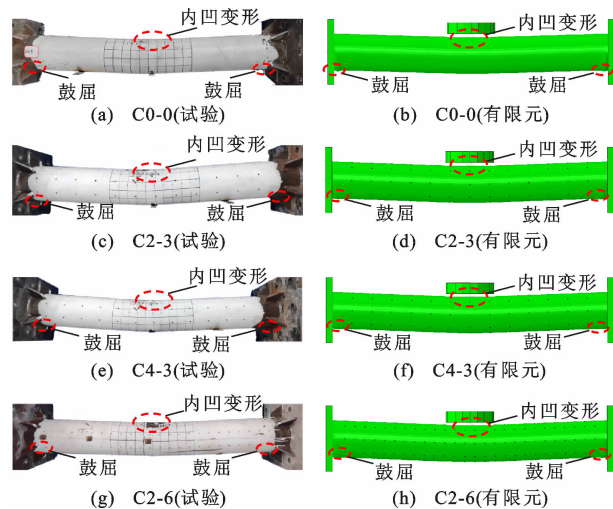
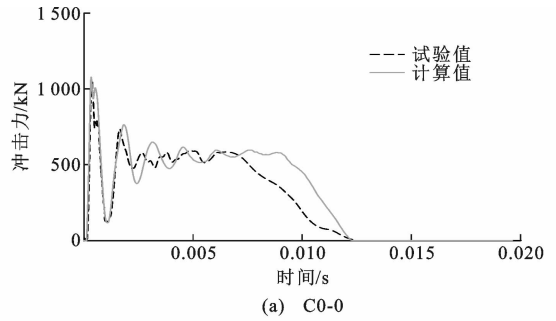


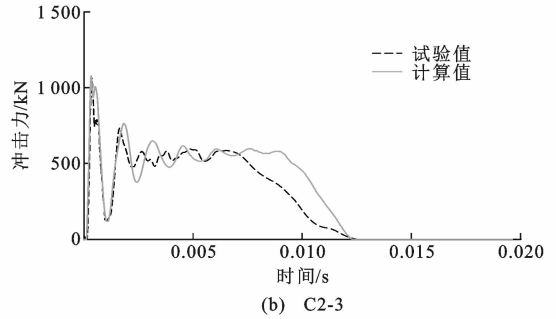
图 4 试验与有限元模型破坏模式对比

Fig. 4 Comparison of failure modes between test and finite element model

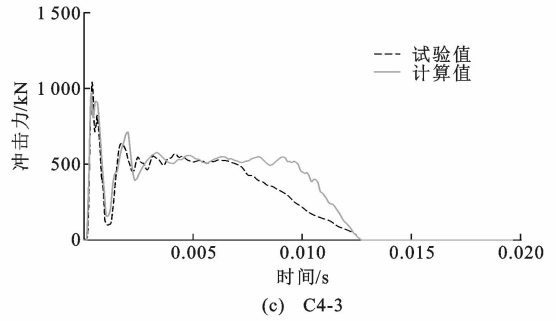
图 6 为有限元计算的冲击力时程曲线与其他相关文献试验曲线的对比,图 7 为冲击力特征值比较,



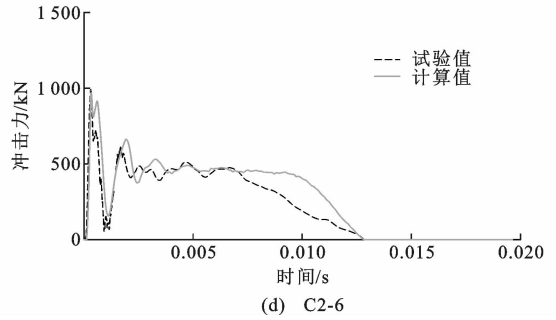
(a) C0-0



(b) C2-3



(c) C4-3



(d) C2-6

图 5 试验与有限元模型冲击力时程曲线对比

Fig. 5 Comparison of impact force time-history curve between test and finite element model

有限元计算的冲击力峰值和冲击力平台值与试验实测结果的相对误差均在 10% 以内,可见二者吻合良好。

3 工作机理分析

本节在上述有限元模型的基础上,对侧向冲击荷载作用下带点状坑槽腐蚀的钢管混凝土柱构件进行工作机理分析,研究构件在侧向冲击作用下的冲击历程、截面弯矩、受力特点、耗能情况等的变化规律。算例参数为:混凝土强度 $f_{cu} = 60$ MPa,钢材强

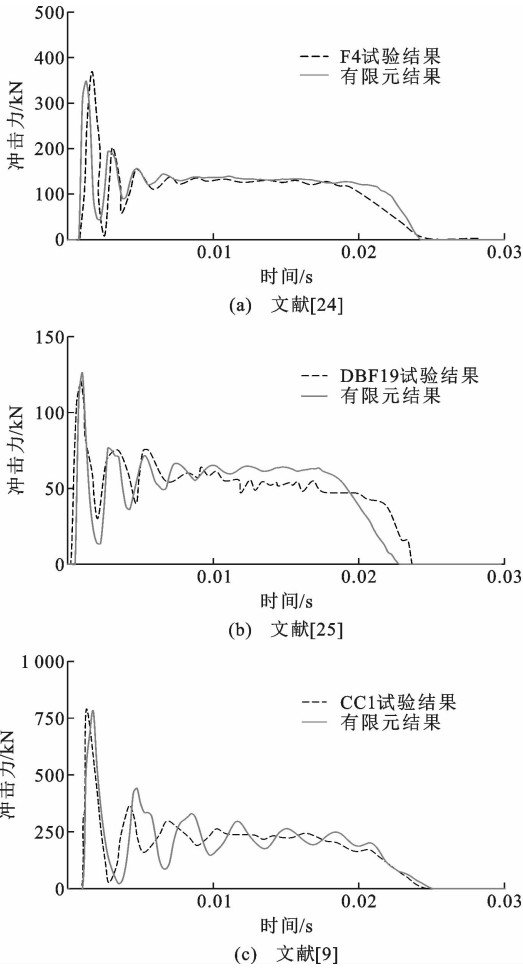


图6 冲击力时程曲线对比

Fig. 6 Comparison of impact force time-history curves

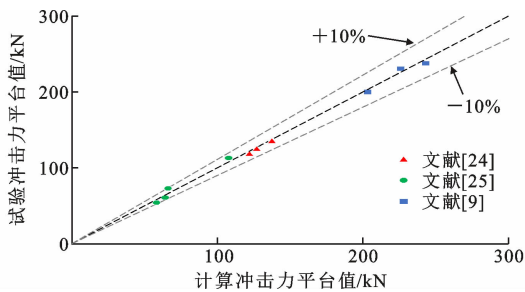


图7 冲击力特征值对比

Fig. 7 Comparison of impact force characteristic values

度 $f_y = 235$ MPa, 钢管长度 $L = 1\ 260$ mm, 钢管外径 $D = 168$ mm, 钢管厚度 $t = 5$ mm, 冲击速度 $V_0 = 9$ m · s⁻¹, 坑槽深度 $d = 2$ mm, 坑槽个数 $N = 8 \times 26$ 。

3.1 冲击历程分析

图8为典型构件量纲一化的冲击力 $F/100$ 、跨中挠度 $\Delta/10$ 、落锤速度 V_c 、构件跨中速度 V_b 随时间的变化曲线。由图8可见, 整个冲击历程分为4个阶段: 在冲击力峰值段(A段), 落锤开始与构件接触, 将自身的动能传递到构件上, 使构件冲击力达到

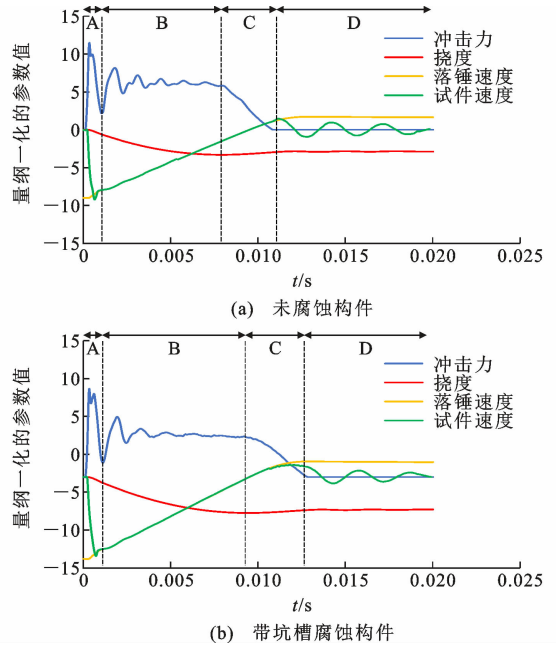


图8 构件的冲击历程

Fig. 8 Impact history of member

峰值, 并且使构件产生很大的向下初速度, 直到构件与落锤的速度达到一致; 在冲击力平台段(B段), 落锤和构件一同向下运动, 落锤和构件的动能转换成构件的塑性变形, 导致落锤和构件的速度不断减小, 而构件的挠度不断增大, 直到产生最大挠度, 而冲击力保持在一定平台值上; 在冲击力下降段(C段), 此时冲击力不断下降, 直到冲击力降为0, 构件的弹性势能释放, 构件的挠度有所下降, 并且发生上下震荡; 在冲击力零值段(D段), 落锤与构件分离, 冲击力维持在0, 构件的挠度趋于稳定。

将带坑槽腐蚀构件与未腐蚀构件进行比较, 因设置的初速度均为 $V_0 = 9$ m · s⁻¹, 所以两者的落锤速度和构件速度相差不大。图9为带坑槽腐蚀构件与未腐蚀构件的冲击力和挠度对比。由图9可见, 带坑槽腐蚀构件的冲击力峰值和平台值明显更低, 而挠度和冲击力持续时间更高, 表明坑槽腐蚀削弱了构件的抗冲击能力。

3.2 截面弯矩分析

为了对跨中截面的弯矩进行分析, 本文使用ABAQUS中的积分输出截面管理器, 分别输出钢管和混凝土截面上所有积分点的弯矩和, 构件跨中截面总弯矩为钢管弯矩与混凝土弯矩的总和。图10为带坑槽腐蚀构件与未腐蚀构件跨中截面钢管弯矩、混凝土弯矩和总弯矩与跨中挠度的关系曲线。可见, 跨中截面的钢管弯矩远大于混凝土弯矩, 这表明冲击过程中钢管是构件抗弯的主要部分。当落锤

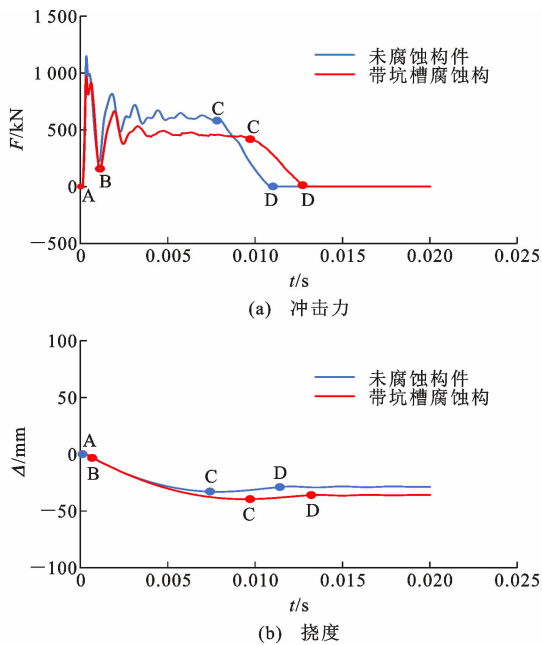


图 9 构件的冲击力和挠度

Fig. 9 Impact force and deflection of member

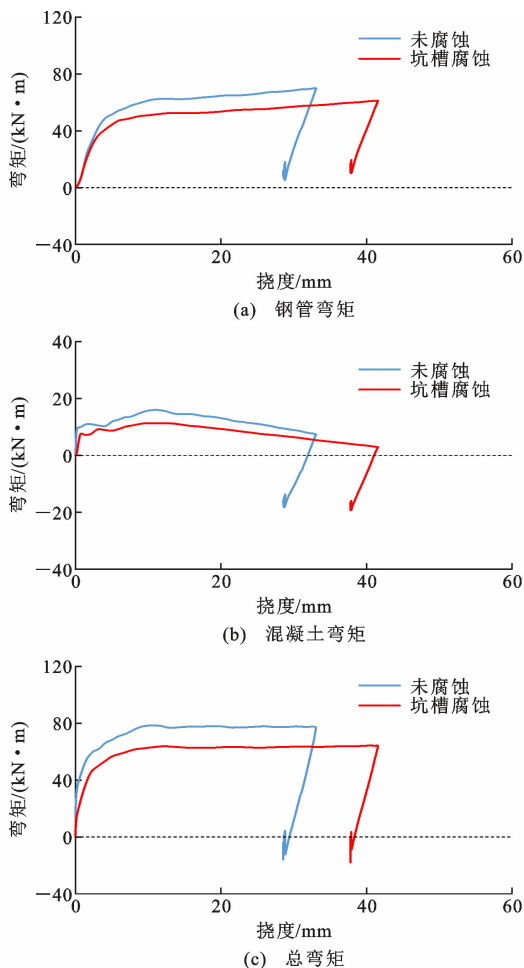


图 10 构件的跨中弯矩-挠度曲线

Fig. 10 Mid-span moment-deflection curve of member

与构件开始接触,钢管处于弹性阶段,中截面钢管和混凝土的弯矩迅速增大;随着钢管逐渐向下运动,钢管进入弹塑性阶段,钢管弯矩仍不断增大,而混凝土弯矩则维持在一定平台值上。当钢管下表面进入强化阶段后,钢管弯矩继续提高,混凝土弯矩则在峰值后开始逐渐下降。

当构件达到极限弯矩时,带坑槽腐蚀的构件相比未腐蚀的构件其钢管弯矩、混凝土弯矩、总弯矩分别降低 26.3%、24.9%、25.6%。上述结果表明,坑槽腐蚀使构件的抗弯能力显著下降,这是由于钢管表面的坑槽腐蚀不仅使钢管更容易发生局部屈曲,并且减少了钢管的有效厚度,由此削弱钢管对混凝土的约束作用,使带坑槽腐蚀构件的钢管弯矩和混凝土弯矩均小于未腐蚀构件。

3.3 接触分析

图 11 为带坑槽腐蚀构件与未腐蚀构件跨中截面的钢管与核心混凝土接触应力-时间曲线。在构件跨中截面上选取 5 个参考点,构件在受动力加载时,截面顶部测点 1 由于直接承受侧向冲击,所以接触力与冲击力历程相似,且存在明显峰值,随后迅速下降,其余测点接触应力远小于截面顶部测点 1。由图 11 可见,带坑槽腐蚀构件与未腐蚀构件相比,其顶部测点 1 的接触应力峰值发生明显下降,测点 1 的接触应力峰值降低 26.1%,而跨中截面其他位置的接触应力也发生下降。上述结果表明,坑槽的存在使钢管和混凝土的接触应力降低,削弱了钢管与混凝土之间的相互作用,这是由于钢管表面的坑槽减少了钢管的有效厚度,降低了钢管对核心混凝土的套箍约束作用,使钢管与混凝土协同工作效应减弱。

3.4 能量分析

图 12 为构件能量-时间曲线,落锤对构件进行侧向冲击的过程遵循能量守恒定律。由图 12 可知:落锤冲击构件的瞬间,落锤将自身的动能传递给构件,并转换为构件的动能、弹性耗能和塑性耗能;当构件与落锤一起向下运动时,构件的弹性势能基本不变,而构件的塑性变形消耗了大部分能量,落锤动能不断下降,直到构件耗能与落锤初动能相等时,冲击过程结束。伪应变能是控制沙漏变形所消耗的能量,在有限元计算中需控制伪应变能在总能量中的占比。本文模型采用减缩积分单元和沙漏增强,控制有限元计算产生的伪应变能低于总能量的 10%。

4 参数分析

为确定各参数对坑槽腐蚀钢管混凝土构件抗侧

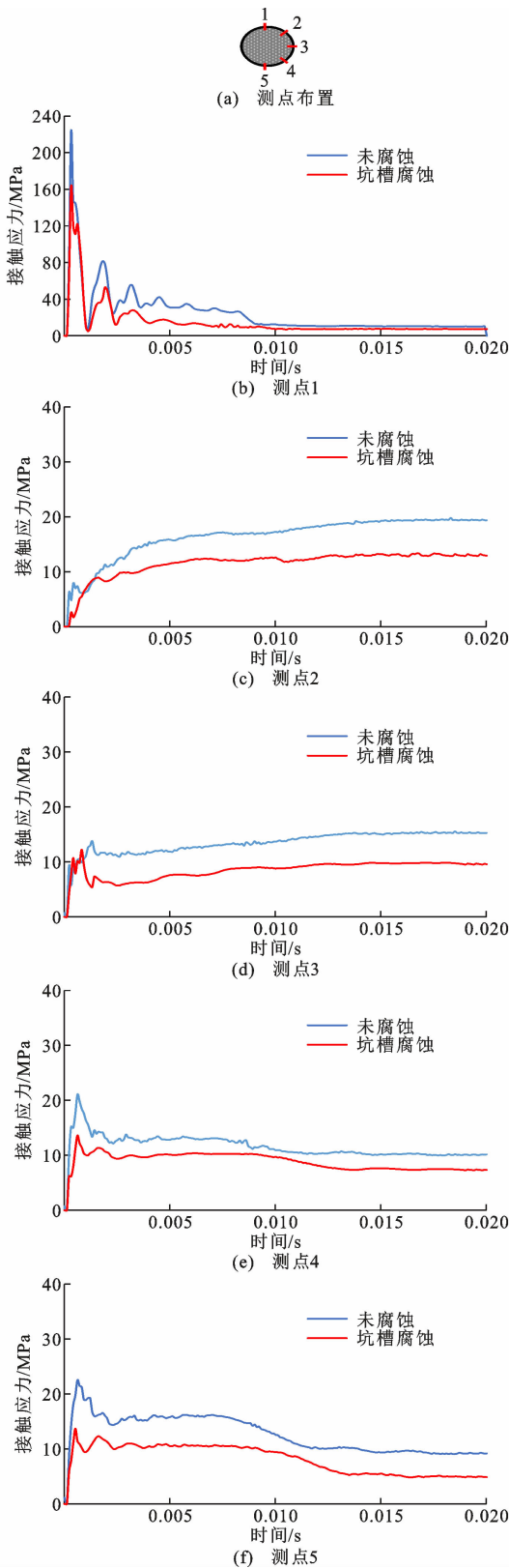


图 11 构件跨中截面的钢管与核心混凝土接触应力-时间曲线

Fig. 11 Contact stress-time curve between steel tube and core concrete in mid-span of member

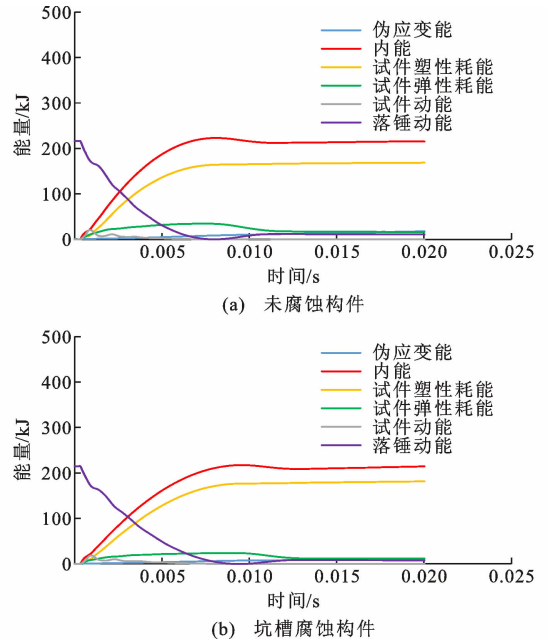


图 12 构件能量-时间曲线

Fig. 12 Energy-time curve of member

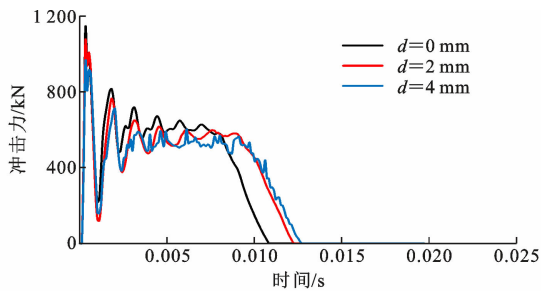
向冲击能力的影响,采用有限元模型分析不同参数对坑槽腐蚀钢管混凝土构件冲击力-时间曲线和挠度-时间曲线的影响。主要参数包括坑槽深度 d 、坑槽个数 N 、腐蚀体积损失度 D_V 、坑槽分布形式和冲击速度 V_0 。参数分析中坑槽腐蚀钢管混凝土构件典型算例尺寸参数如下:混凝土强度 $f_{cu} = 60$ MPa, 钢材强度 $f_y = 235$ MPa, 钢管长度 $L = 1\ 260$ mm, 钢管外径 $D = 168$ mm, 钢管厚度 $t = 5$ mm, 冲击速度 $V_0 = 9\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 坑槽深度 $d = 2$ mm, 坑槽个数 $N = 8 \times 13$ 。

4.1 坑槽深度

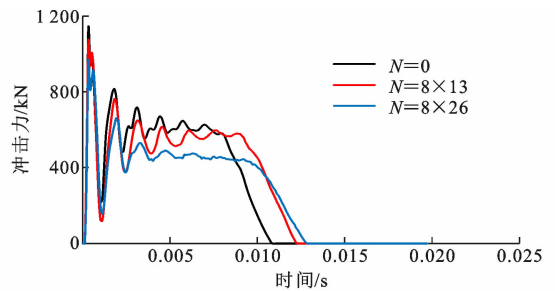
为探究坑槽深度对钢管混凝土构件抗侧向冲击性能的影响,在有限元模型中坑槽深度 d 分别取 0、2、4 mm,并保持坑槽个数为 8×13 ,坑槽分布为均匀分布。图 13(a)、(b)分别为不同坑槽深度下构件的冲击力-时间曲线和挠度-时间曲线。由图 13 可见,随着坑槽深度的增加,构件的冲击力峰值和冲击力平台值减小,冲击时间和跨中挠度均增加。坑槽深度为 2 mm 的腐蚀构件冲击力峰值和冲击力平台值比未腐蚀构件分别降低 5.9%、10.4%,而跨中极限挠度增大 15.5%;坑槽深度为 4 mm 的腐蚀构件冲击力峰值、冲击力平台值比未腐蚀构件分别降低 15.3%、11.9%,而跨中极限挠度增加 19.7%。

4.2 坑槽个数

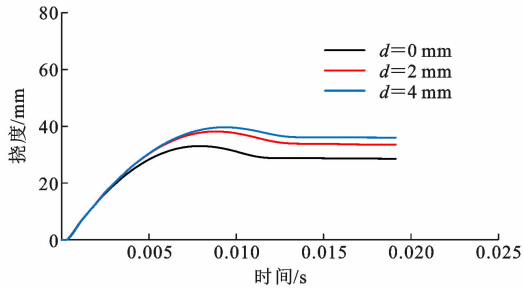
为探究坑槽个数对钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响,在有限元模型中坑槽个数分别取 0、



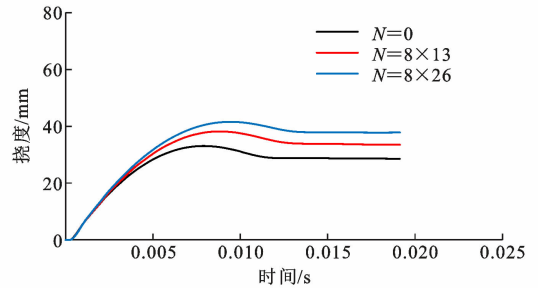
(a) 冲击力-时间曲线



(a) 冲击力-时间曲线



(b) 挠度-时间曲线



(b) 挠度-时间曲线

图 13 坑槽深度的影响

Fig. 13 Influence of pit depth

8×13、8×26,并保持坑槽深度为 2 mm,坑槽分布为均匀分布。图 14 为不同坑槽个数下构件的冲击力-时间曲线、挠度-时间曲线。由图 14 可见,随着坑槽个数的增加,构件的冲击力峰值和平台值发生下降,而冲击时间和跨中挠度均增加。当坑槽个数增加到 8×13 时,其冲击力峰值和冲击力平台值比未腐蚀构件分别降低 5.9%、11.4%,而跨中极限挠度比未腐蚀构件增加 15.5%。当坑槽个数增加到 8×26 时,其冲击力峰值和冲击力平台值比未腐蚀构件分别降低 15.4%和 24.2%,而跨中极限挠度比未腐蚀构件增加 23.9%。

4.3 腐蚀体积损失度

钢管混凝土构件受坑槽腐蚀的程度可用腐蚀体积损失度 D_V 来表达,如式(4)所示。

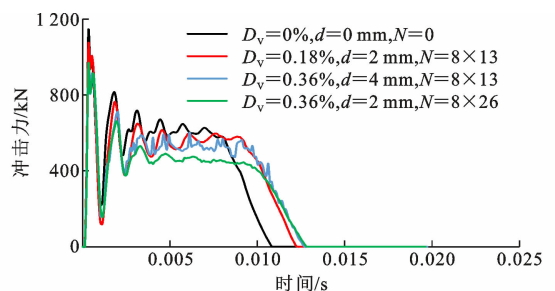
$$D_V = \frac{\sum_{i=1}^N \pi r_i^2 d_i}{V_u} \quad (4)$$

式中: r_i 为第 i 个坑槽的半径; d_i 为第 i 个坑槽的深度; V_u 为钢管未腐蚀前体积。

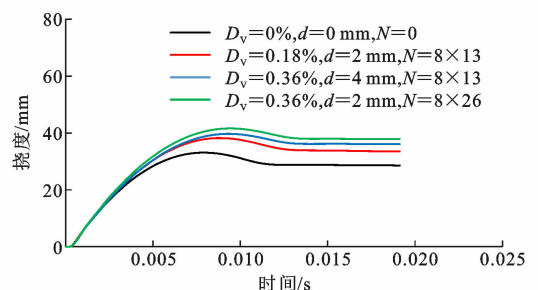
图 15 为腐蚀体积损失度对构件冲击力-时间曲线、挠度-时间曲线的影响。由图 15 可见,构件冲击力峰值和平台值随着腐蚀体积损失度的增加而降低,冲击力持续时间和跨中极限挠度随着腐蚀体积损失度的增加而增加。可以发现,当腐蚀体积损失度相同时,坑槽深度为 2 mm、坑槽个数为 8×26 的构件比坑槽深度为 4 mm、坑槽个数为 8×13 的构

图 14 坑槽个数的影响

Fig. 14 Influence of number of pits



(a) 冲击力-时间曲线



(b) 挠度-时间曲线

图 15 腐蚀体积损失度的影响

Fig. 15 Influence of corrosion volume loss

件冲击力平台值更低,坑槽深度为 2 mm、坑槽个数为 8×26 的构件冲击力平台值比坑槽深度为 4 mm、坑槽个数为 8×13 的构件降低 12.3%。因此,在相同腐蚀体积损失度的情况下,坑槽个数比坑槽深度对钢管混凝土构件的抗侧向冲击能力有更显著的影响。这可能是由于相较于坑槽深度的局部影响,坑槽个数的增加扩大了缺陷在钢管表面的分布范围,因此其对钢管整体性能的影响更加显著。

4.4 坑槽分布形式

为探究坑槽分布形式对钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响,在有限元模型中保持坑槽深度为 2 mm 和坑槽个数为 8×13 个,比较坑槽均匀分布和不均匀分布对构件抗侧向冲击性能的影响,坑槽分布如图 2 所示。图 16(a)、(b)分别为不同坑槽分布形式下构件的冲击力-时间曲线、挠度-时间曲线。由图 16 可见,坑槽不均匀分布的构件相比于均匀分布的构件,其冲击力平台值下降 3.6%,跨中极限挠度提高了 3.8%,冲击力持续时间略有增加,但是冲击力峰值变化不大。上述分析结果表明,坑槽不均匀分布相比于均匀分布对钢管混凝土抗侧向冲击性能的影响更加不利。

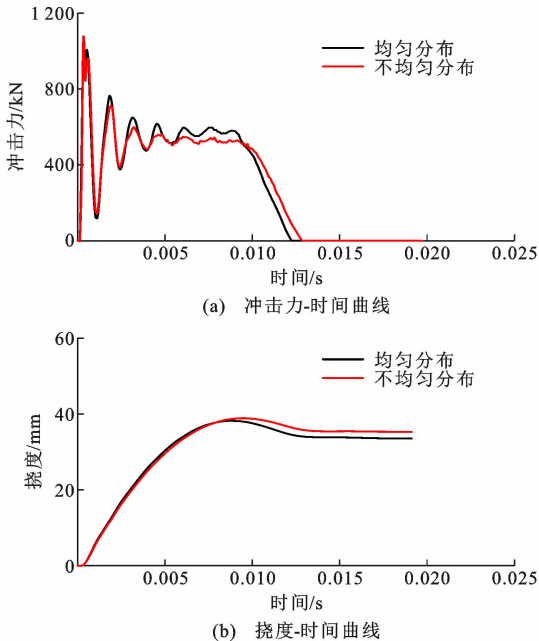


图 16 坑槽分布形式的影响

Fig. 16 Influence of pit distribution pattern

4.5 冲击速度

为探究冲击速度对钢管混凝土柱抗侧向冲击性能的影响,在保持落锤质量不变的情况下,通过采用不同的冲击速度对构件进行侧向冲击,研究其力学性能,冲击速度分别选取 $7, 9, 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 17 为不同冲击速度下构件的冲击力-时间曲线、挠度-时间曲线。当冲击速度从 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,构件的冲击力峰值和平台值分别增加 24.55% 和 12.01%,跨中挠度增加 45.11%。由此可见,冲击速度对构件的力学性能影响显著,随着冲击速度的增大,冲击力峰值和平台值、跨中挠度和冲击力持续时间均显著增大。

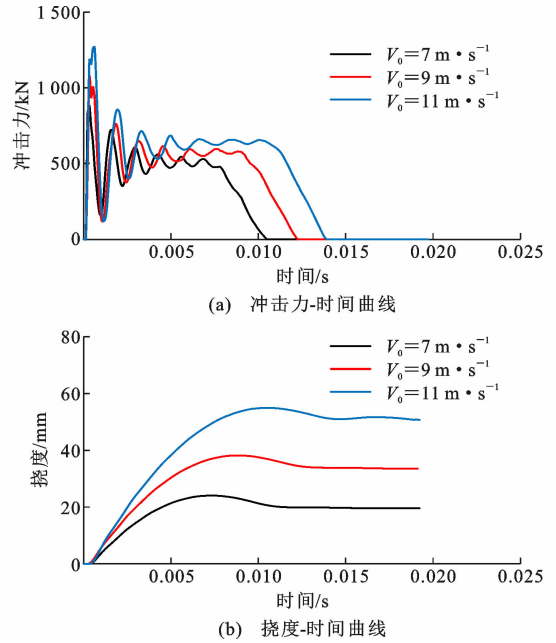


图 17 冲击速度的影响

Fig. 17 Influence of impact velocity

5 结语

(1) 钢管坑槽腐蚀不仅使钢管更容易发生局部屈曲,并且削弱了钢管和混凝土之间的相互作用,使构件中钢管和混凝土分别所承担的弯矩均有所降低,导致坑槽腐蚀构件的冲击力峰值和平台值较无腐蚀构件明显减小,而挠度和冲击力持续时间增加。

(2) 随着坑槽深度、个数和腐蚀体积损失度的增加,坑槽腐蚀对钢管混凝土侧向冲击力峰值、平台值以及极限挠度的影响更为显著。坑槽个数为 8×13 的构件冲击力峰值和平台值比未腐蚀构件分别降低 5.9%、11.4%,而跨中极限挠度增大 15.5%;坑槽个数为 8×26 的构件冲击力峰值、平台值比未腐蚀构件分别降低 15.4% 和 24.2%,而跨中极限挠度增加 23.9%。

(3) 在相同腐蚀体积损失度的条件下,坑槽个数比坑槽深度对钢管混凝土构件的抗侧向冲击能力有更显著的影响。这是由于相较于坑槽深度的局部影响,坑槽个数的增加扩大了缺陷在钢管表面的分布范围,因此其对钢管整体性能的影响更加显著。坑槽不均匀分布情况相比于均匀分布情况对钢管混凝土抗侧向冲击性能的影响更加不利。

参考文献:

References:

[1] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 3 版. 北

- 京:科学出版社,2016.
- HAN Linhai. Concrete-filled steel tubular structures: theory and practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] 韩恩厚,陈建敏,宿彦京,等. 海洋工程材料和结构的腐蚀与防护[M]. 北京:化学工业出版社,2017.
- HAN Enhou, CHEN Jianmin, SU Yanjing. Corrosion and protection for marine, offshore and coastal structures[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [3] 工业建筑防腐蚀设计标准:GB/T 50046—2018[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- Standard for anticorrosion design of industrial constructions: GB/T 50046—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [4] 王仁华,赵沙沙. 随机点蚀损伤钢板的极限强度预测[J]. 工程力学,2018,35(12):248-256.
- WANG Renhua, ZHAO Shasha. Ultimate strength prediction of steel plate with random pitting corrosion damage[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(12): 248-256.
- [5] WANG R H, SHENOI R A. Experimental and numerical study on ultimate strength of steel tubular members with pitting corrosion damage[J]. Marine Structures, 2019, 64: 124-137.
- [6] 杨明飞,沙志平,陈宜网,等. 局部腐蚀损伤下钢结构整体抗震性能研究[J]. 黄山学院学报,2020, 22(5): 74-77.
- YANG Mingfei, SHA Zhiping, CHEN Yiwang, et al. Study on seismic performance of steel structures with local corrosion[J]. Journal of Huangshan University, 2020, 22(5): 74-77.
- [7] 廖 翔,李吉人,王庆利,等. 局部腐蚀方中空夹层钢管混凝土偏压性能研究[J]. 结构工程师,2021, 37(4):48-57.
- LIAO Xu, LI Jiren, WANG Qingli, et al. Research on the eccentric compression performance of square CFST under local corrosion[J]. Structural Engineers, 2021, 37(4): 48-57.
- [8] LI G, HOU C, SHEN L M. Life-cycle analysis of FRP-strengthened offshore CFST columns suffering from steel corrosion [J]. Composite Structures, 2021, 277: 114607.
- [9] 侯川川. 低速横向冲击荷载下圆钢管混凝土构件的力学性能研究[D]. 北京:清华大学,2012.
- HOU Chuanchuan. Study on performance of circular concrete-filled steel tubular (CFST) members under low velocity transverse impact[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [10] WANG R, HAN L H, HOU C C. Behavior of concrete filled steel tubular (CFST) members under lateral impact: experiment and FEA model[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80: 188-201.
- [11] HAN L H, HOU C C, ZHAO X L, et al. Behaviour of high-strength concrete filled steel tubes under transverse impact loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 92: 25-39.
- [12] HOU C C, HAN L H. Life-cycle performance of deteriorated concrete-filled steel tubular (CFST) structures subject to lateral impact[J]. Thin-walled Structures, 2018, 132: 362-374.
- [13] 康昌敏,王 蕊,朱 翔. 轴压比对钢管混凝土柱侧向冲击性能影响研究[J]. 工程力学,2020, 37(增1): 254-260.
- KANG Changmin, WANG Rui, ZHU Xiang. The influence of axial compression ratio on the lateral impact performance of concrete filled steel tube columns [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(S1): 254-260.
- [14] HAN L H, YAO G H, TAO Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion [J]. Thin-walled Structures, 2007, 45(1): 24-36.
- [15] DAI P J, LIAO F Y, HOU C C, et al. Performance of concrete filled steel tubular (CFST) members with circumferential gap under lateral impact[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 210: 108103.
- [16] 潘 爽. 侧向冲击下方中空夹层钢管混凝土柱动力响应与剩余承载力研究[D]. 福州:福建农林大学, 2024.
- PAN Shuang. Study on dynamic responses and residual axial bearing capacity of square CFST columns under lateral impact[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024.
- [17] ZHOU X Q, HAO H. Modelling of compressive behaviour of concrete-like materials at high strain rate [J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(17): 4648-4661.
- [18] PAN Z F, ZHANG H P, ZENG B, et al. Statistical evaluation of CEB-FIP 2010 model for concrete creep and shrinkage[J]. Materials, 2023, 16(4): 1576.
- [19] 康 苗,朱 翔,王 蕊,等. 侧向冲击作用下圆钢管- 钢筋混凝土柱抗冲击性能研究[J]. 建筑结构学报, 2020,41(增1):128-135.
- KANG Miao, ZHU Xiang, WANG Rui, et al. Study

- on impact resistance of circular steel tube columns filled with steel-reinforced concrete under lateral impact [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(S1): 128-135.
- [20] 侯川川,王蕊,韩林海.低速横向冲击下钢管混凝土构件的力学性能研究[J].*工程力学*,2012,29(增1): 107-110.
HOU Chuanchuan, WANG Rui, HAN Linhai. Performance of concrete-filled steel tubular (CFST) members under low velocity transverse impact [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(S1): 107-110.
- [21] 郭志辉.圆中空夹层钢管混凝土抗撞设计方法研究[D].太原:太原理工大学,2021.
GUO Zhihui. Research on impact resistance design methods of circular concrete filled double-skin steel tubular[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [22] NAKAI T, MATSUSHITA H, YAMAMOTO N, et al. Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (1st report)[J]. *Marine Structures*, 2004, 17(5): 403-432.
- [23] 秦静远.考虑点蚀损伤的海工钢管力学性能研究[D].大连:大连理工大学,2020.
QIN Jingyuan. Study on mechanical properties of marine steel pipe considering pitting damage [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [24] 刘亚玲.常见约束类型的钢管混凝土构件侧向冲击响应试验研究与数值分析[D].太原:太原理工大学, 2005.
LIU Yaling. Experiment research and numerical analysis of lateral impact respond of steel tube-confined concrete at common type restrain [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2005.
- [25] 王蕊.钢管混凝土结构构件在侧向撞击下动力响应及其损伤破坏的研究[D].太原:太原理工大学, 2008.
WANG Rui. Study on the dynamic response and damage failure of concrete filled steel tube under lateral impact [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.