

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.07.14

建筑钢管混凝土柱焊接变形量预测研究

路 伟, 侯 彬*

山东恒信建筑设计有限公司, 山东 济南 250100

摘 要: 针对建筑钢管混凝土柱钢框架焊接变形预测精度不足的问题, 本研究提出一种基于高精度有限元模拟与固有应变理论的预测方法。首先利用ABAQUS软件构建精确的钢管混凝土柱有限元模型, 模型包含方钢管柱、H型钢梁、内隔板, 并填充混凝土, 材料本构分别采用韩林海模型和双线性随动强化模型。其次, 应用Visual-Mesh工具进行精细化的焊接网格划分与分组, 并采用“生死单元”技术模拟8道CO₂保护焊的多层多道焊过程(焊接电压32 V, 电流280 A, 效率78.5%, 焊接速度9~14 mm/s, 时间间隔45 s)。最后, 基于高斯热源模型计算热输入, 提取并模拟焊接过程中产生的纵向固有应变和横向固有应变及其对应的固有应力, 据此预测焊接变形量。在某高层建筑工程钢管混凝土柱上进行实验测试。结果表明, 该方法预测的焊接变形量在X、Y、Z三个方向上的预测误差均低于10 mm。该方法预测精度高, 为优化焊接顺序、控制焊接变形以及指导构件预变形提供了可靠依据, 具备工程应用潜力。

关键词: 建筑钢管混凝土柱钢框架; 有限元模型; 多层多道焊; 焊变形量预测

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)07-0123-07

Research on Prediction of Welding Deformation of Steel Pipe Concrete Columns in Buildings

LU Wei, HOU Bin*

Shandong Hengxin Architectural Design Co., Ltd., Ji'nan 250100 China

Abstract: To address the insufficient prediction accuracy of welding deformation in building steel tube concrete column frames, this study proposes a prediction method based on high-precision finite element simulation and inherent strain theory. Firstly, a precise finite element model of the concrete-filled steel tube column was constructed using ABAQUS software. The model includes square steel tube columns, H-shaped steel beams, internal diaphragms, and filled concrete. Material constitutive behaviors were defined using the Han Linhai model for concrete-filled steel tubes and the bilinear kinematic hardening model for steel. Secondly, the Visual-Mesh tool was employed for refined welding mesh partitioning and grouping. The multilayer multi-pass welding process with 8 passes of CO₂ shielded welding (welding voltage: 32 V, current: 280 A, efficiency: 78.5%, welding speed: 9-14 mm/s, time interval: 45 s) was simulated using the "birth and death element" technique. Finally, by establishing a Gaussian heat source model to calculate thermal input, the longitudinal and transverse inherent strains generated during welding and their corresponding inherent stresses were extracted and simulated. The welding deformation was predicted based on these parameters. Experimental tests were conducted on concrete-filled steel tube columns in a high-rise building project. Results demonstrate that the prediction errors of welding deformation using this method are all below 10 mm in the X-, Y-, and Z-directions. The prediction accuracy of this method is high, providing a reliable basis for optimizing welding sequences, controlling welding deformation, and guiding component pre-deformation. It demonstrates significant practical potential for engineering applications.

收稿日期: 2024-10-12 修回日期: 2025-01-09

基金项目: 山东省住房和城乡建设厅研究开发项目(2023-K5-18)

作者简介: 路 伟(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事建筑结构设计研究。E-mail: yagg2005@126.com。

通讯作者: 侯 彬(1976—), 男, 高级工程师, 主要从事建筑结构设计。

Keywords: building steel pipe concrete column steel frame; finite element model; multi layer and multi pass welding process; prediction of welding deformation

引用格式:路伟,侯彬. 建筑钢管混凝土柱焊接变形量预测研究[J]. 电焊机,2025,55(7):123-129.

Citation:LU Wei, HOU Bin. Research on Prediction of Welding Deformation of Steel Pipe Concrete Columns in Buildings[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(7): 123-129.

0 引言

当前许多高层建筑采用钢管混凝土柱钢框架+混凝土核心筒的组合结构,其中钢结构与混凝土结构交替分段施工。通常,首层至中层的平面会逐渐扩大,而中层以上至顶层屋面逐渐向内收缩,钢板厚度约为 100 mm。由于此类建筑外框柱每层均存在一定的倾角,在转换桁架施工过程中需要添加临时支撑,以实现分段吊装^[1-2]。在吊装过程中,斜撑受力点的改变会影响到整体建筑结构的受力情况。因此,必须确保建筑钢管混凝土柱钢框架的坚固性,特别是针对焊接变形的问题,应尽量减小其影响。因此有必要对建筑钢管混凝土柱焊接变形量预测问题进行研究。

徐雨平提出一种智能垃圾车箱体结构焊接变形数值预测方法^[3],主要应用有限元方法实施了数值模拟仿真,构建了箱体结构的六面体实体单元模型,并得出了最小变形量的焊接顺序。但是六面体实体单元模型不足以准确描述焊接过程中的细微变形。导致焊接变形量预测性能较差。瞿铁等人^[4]采用集成计算方法预测开式锻焊齿轮的焊接变形,将固有变形转化成固有应变,并实施了大型开式锻焊齿轮的数值模拟。但是该方法在模拟过程中忽略了热传导与残余应力对变形的影响,使得焊接变形量的预测受到影响。孙强等人^[5]采用 Msc. Marc 软件在相同条件下对激光焊接结果进行模拟计算,采用刚性固定法和预应力法减少焊接变形量,但刚性固定法的有效性取决于多个因素,在实际应用中难以准确地模拟或实施,导致预测性能较差。张杨等人研究不锈钢薄板激光焊接头变形及预测,阐述激光焊接工艺下的焊缝几何尺寸对变形的影响^[6],分析焊接变形预测的热源模型。但是热源模型是用来描述焊接过程中的热源特性以及热输入,而热源特性和热输入往往是复杂而动态的,随着时间和

空间的变化可能发生变化,无法准确地描述实际情况,使得焊接变形量的预测受到影响。

针对现有方法存在的局限和问题,本研究提出一种融合有限元仿真与固有应变理论的焊接变形预测方法,基于 ABAQUS 构建钢管混凝土柱参数化模型,并应用 Visual-Mesh 划分焊接网格,通过“生死单元”技术动态模拟多层多道焊工艺,最终构建焊接变形预测模型。该研究成果可以为优化焊接顺序与构件预变形控制提供参考。

1 建筑钢管混凝土柱焊接变形量预测方法设计

1.1 钢管混凝土柱有限元模型构建

钢管混凝土柱有限元模型构建流程如下:

(1)定义几何模型。采用 ABAQUS 软件构建钢管混凝土柱有限元模型。在 H 型钢梁上下翼缘对冲的方钢管内壁实施内隔板的焊接,使用对接焊缝将方钢管壁与钢梁的腹板及上下翼缘焊接在一起。各部位的尺寸制定为:方钢管柱 500 mm×500 mm×14 mm;H 型钢梁 350 mm×120 mm×5 mm×10 mm;梁长度 1 800 mm;内隔板厚度 18 mm。在柱内填充混凝土。

(2)内隔板开洞削弱。内隔板开洞削弱是在内隔板上开设孔洞,以达到削弱结构整体强度、提高模型稳定性的目的。在内隔板开洞削弱中,以削弱参数 R 为孔洞半径,削弱参数 L 为柱壁到孔洞中心的距离。 R 与 L 的取值如图 1 所示。

梁、柱均采用梁单元来模拟,内隔板、方钢管柱、H 型钢梁核心混凝土则采用八节点线性减缩积分六面体沙漏控制单元来模拟^[7]。

(3)模型组装。

将各个部件组装在一起,形成一个完整的结构模型。需要使用 ABAQUS 的“form new part”功能

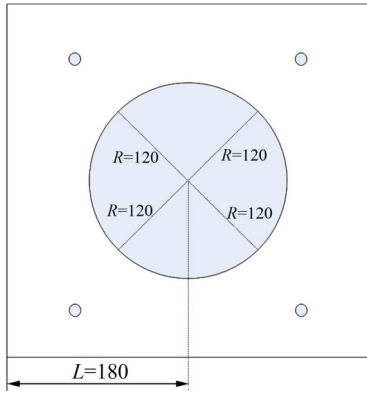


图1 R与L的取值

Fig. 1 Values of R and L

将各个部件设定为固接的整体。然后通过接触设置实现各部分之间的固接连接。

(4) 材料本构模型设定。

钢管混凝土材料本构模型采用韩林海模型,具体表达式如下:

$$\beta = \begin{cases} 2 \cdot \alpha - \alpha^2 & \alpha \leq 1 \\ \frac{\alpha}{\chi_0 \cdot (\alpha - 1)^\delta + \alpha} & \alpha > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 α 为钢管外径比; χ_0 为壁厚; δ 为核心砼质量^[8]。

针对钢管混凝土材料的塑性损伤现象,使用了塑性损伤模型进行描述。在ABAQUS中,该模型的输入值具体如下:膨胀角 30° ;粘滞系数 0.005;塑性势能的偏角流动缺省值 0.2;双轴等压时钢管混凝土强度和其单轴抗压强度比值的缺省值 1.28;拉子午线与压子午线上第二应力不变量之比的缺省值 $2/3$ 。

(5) 钢材的本构模型设定。

钢材的本构模型采用双线性随动强化模型,其描述了应力和应变之间的关系,表达式如下所示:

$$\phi = \begin{cases} \frac{\phi \beta}{S_w} & \phi \leq g_f \\ \frac{g_f}{S_w} + \frac{\phi - g_f}{\gamma S_w} & \phi > g_f \end{cases} \quad (2)$$

式中 ϕ 为钢材的单向拉伸时屈服应力; S_w 为钢材的本构关系曲线; g_f 为钢材的屈服强度; γ 为弹性模量系数; γS_w 为强化阶段的弹性模量^[9]。

(6) 完成模型构建。

在ABAQUS中采用 Von Mises 屈服准则,根据式(3)输入偏应力张量分量、材料内部应力和材料单向拉伸时的屈服应力,完成模型的构建。

$$R(\phi_{ij}) = \frac{1}{2} u_{ij}^2 \phi - \frac{1}{2} \phi_f^2 = 0 \quad (3)$$

式中 ϕ_{ij} 为偏应力张量分量; u_{ij} 为材料内部应力; ϕ_f 为材料单向拉伸时的屈服应力。

完成钢管混凝土柱有限元模型的构建后,需要对其实施焊接定义。

1.2 焊接过程建模参数定义

对于构建的钢管混凝土柱有限元模型,采用 visual-mesh 网格划分工具对模型与构件实施焊接网格划分。并对网格模型实施焊接分组,具体分组包括换热面、装夹条件、参考线、焊接线、焊缝组、母材组。参考线和焊接线分为不同的部分,包括开始单元、结束节点和开始节点^[10]。

在焊接过程中,确定外加热源位置时需要基于参考线与焊接线构建局部坐标系,并通过该坐标系来决定。参考线与焊接线均位于焊缝中心并且互相平行。根据局部坐标系的设定, X 轴代表参考线的方向, Y 轴代表焊接线的方向,而 Z 轴则垂直于参考线和焊接线所在平面。坐标系中心与热源中心重合,指向 Z 方向,并且沿着焊接线方向移动,热源坐标系、参考线、焊接线具体如图2所示。

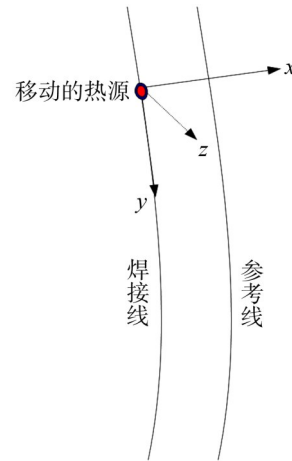


图2 热源坐标系、参考线、焊接线示意

Fig. 2 Heat source coordinate system, reference line, and welding line diagram

建筑钢管混凝土柱焊接接头本材料定为 DH36 钢,由于整个接头在散热与加热过程中全部与空气接触,因此将散热面定义为整个板材的外表面^[11]。将初始温度设为 20°C ,散热时间设为 $0 \sim 3\,600\text{ s}$ 。为防止由于不收敛而生刚性位移,需要设置装夹约束条件,具体如图3所示。装夹时间也设置为 $0 \sim$

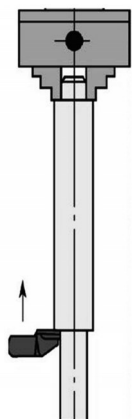


图3 设置的装夹约束条件

Fig. 3 Constraint condition of clamping

3600 s。通过“生死”单元法对焊层不断添加的过程进行准确反应,具体过程为将焊层分为多组,在对第一道实施焊接时“杀”死全部其余焊层单元,不参与传热过程。随着继续进行焊接,依据焊道顺序逐渐激活“死”的单元,开始参与焊缝材料的施加与传热过程^[12]。建筑钢管混凝土柱多层多道焊接工艺的参数具体如表1所示,焊接方法采用CO₂保护焊。就此完成钢管混凝土柱有限元模型的焊接定义。

表1 混凝土柱多层多道焊接工艺参数

Table 1 Parameters of multi-layer and multi-pass welding process for concrete columns

焊接 次序	起始 时间	焊接电压 /V	焊接电流 /A	焊接效率 /%	焊接速度 /(mm·s ⁻¹)
第一道	0	32	280	78.5	9
第二道	45	32	280	78.5	10
第三道	90	32	280	78.5	11
第四道	135	32	280	78.5	12
第五道	180	32	280	78.5	13
第六道	225	32	280	78.5	14
第七道	270	32	280	78.5	12
第八道	315	32	280	78.5	12

1.3 焊接变形量预测

在焊接过程中,焊件可以分为三个区域,其中在固有应变区即母材熔化区,材料会发生不可逆的塑性变形^[13]。则焊接变形量预测具体流程如下:

(1)高斯热源模型在一定范围内适用于多种焊接过程和材料。它可以很好地捕捉焊接过程中的热输入分布情况,并提供与实验或其他方法相匹配的准确度和稳定性。选取高斯热源模型作为模型的焊接热源模型,其热输入计算公式为:

$$Q(x, y, t) = \frac{\exp\left[\frac{-(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2}{4\alpha t}\right]}{4\pi\alpha t R(\varphi_{ij})} \quad (4)$$

式中 Q 为热通量密度; (x_0, y_0) 为焊接点坐标; α 为热扩散系数; t 为时间^[14]。

(2)模拟固有应变。

将纵向、横向固有应变设为 L_x, L_y , 表达式如下:

$$L_x = PZ + R(\varphi_{ij})Q(x, y, t) \quad (5)$$

$$L_y = \eta ZL_x \quad (6)$$

式中 P 为纵向固有应变系数; Z 为电弧电压; η 为横向固有应变系数^[15]。

将纵向固有应力用 κ_x^* 来表示,用 κ_y^* 表示横向固有应力,则二者可以用下式来表示:

$$\kappa_x^* = \frac{\eta L_x}{E_i} \quad (7)$$

$$\kappa_y^* = \kappa_x^* \frac{L_y}{E_i} \quad (8)$$

式中 E_i 为固有应力的面积。

(3)计算焊件变形量

根据模拟的固有应变来计算焊接后的总形变^[16]。常用的表达式有:利用纵向固有应力 κ_x^* 与横向固有应力 κ_y^* 来计算焊接后的总形变。

$$\Delta L = (\kappa_x^* \kappa_y^*) L \quad (9)$$

式中 L 为原始长度。根据上述流程即可获得钢管混凝土柱的变形量预测结果。

2 实验测试

2.1 实验项目

实验项目为一个地上结构为钢管混凝土柱钢框架+混凝土核心筒组合结构,地下结构为钢管混凝土柱钢框架+抗震墙结构的建筑工程,其用地面积 6 616.94 m²,总建筑面积约为 92 236.11 m²。建筑高度 179.80 m;地上裙房共 3 层,建筑高度 16.20 m。塔楼第一层层高为 5.95 m,标准层的层高为 4.35 m,2~3 层之间的高度为 4.5 m,避难层层高为 5.05 m。31~40 层高 4.5 m,电梯机房层层高 4.7 m,屋顶设备层层高 3.9 m,8F、19F、30F 设置为转换层、避难层;裙房地上 1 层层高 6 m,2~3 层层高 5.1 m。

该工程桩基设计等级为甲级,主楼框架采用大直径端承桩,一柱一桩,桩径1 800~2 000 mm,纯地下范围(含裙楼挑空开敞区域)及裙楼区域采用直径1200mm钻孔灌注桩,主体结构底板形式为承台下平板式防水板。

2.2 实验流程

利用设计的建筑钢管混凝土柱焊接变形量预测方法对实验项目实施不同焊接顺序下整个钢管混凝土柱框架的变形量预测,测试设计方法的变形量预测性能。采用ABAQUS软构建件有限元模型如图4所示。

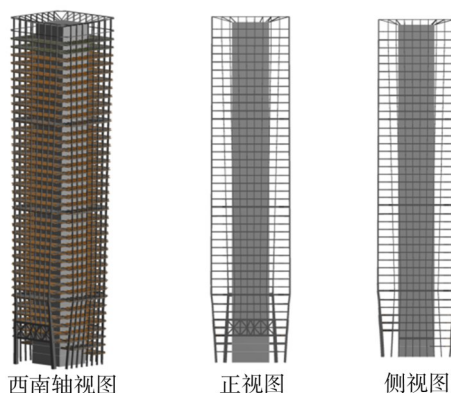


图4 实验钢管混凝土柱的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of experimental concrete-filled steel tube columns

接着对构建的钢管混凝土柱有限元模型实施焊接定义。其中焊接处的网格划分情况如图5所示。则8道焊缝的温度场分布云图如图6所示。

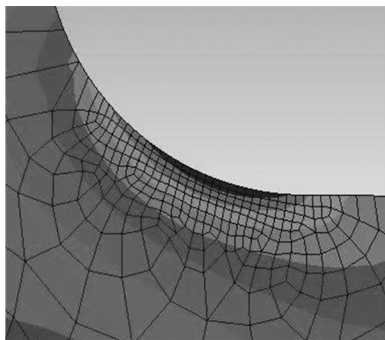


图5 焊接处的网格划分情况

Fig. 5 Mesh partition of the welding joint

2.3 实验指标

在建筑钢管混凝土柱焊接变形量预测研究中,预测误差是用于评估预测结果与实际观测数据之间的差异程度的指标。用来衡量预测模型的准确

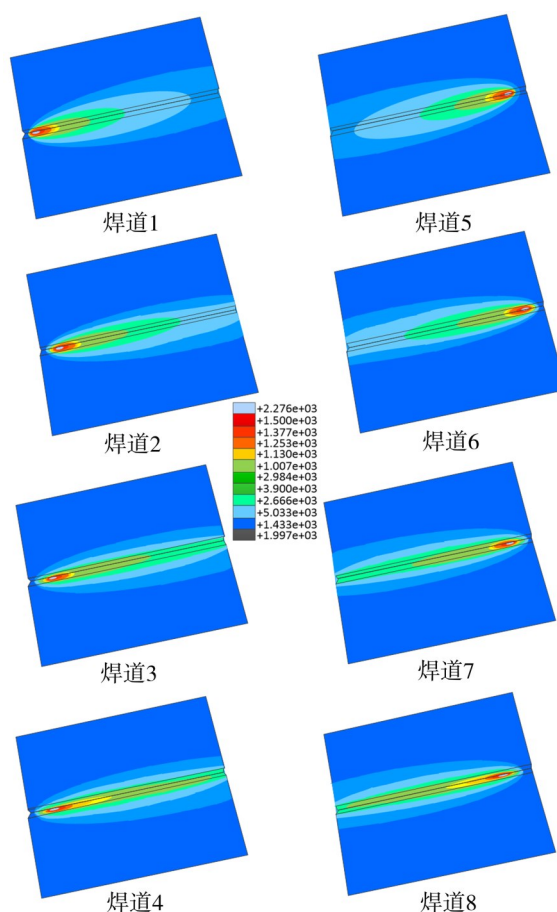


图6 焊缝温度场分布图

Fig. 6 Weld temperature field distribution

性和可靠性。预测误差可以通过以下表达式计算:

$$MRE = \left(\sum \frac{1}{N} \frac{P-O}{O} \right) \times 100\% \quad (10)$$

式中 P 为预测值, O 为观测值, N 为样本数量。较小的预测误差值表示预测结果与实际观测值之间的差异较小,即预测模型的准确性较高。

2.4 预测误差结果分析

在测试中,将智能垃圾车箱体结构焊接变形数值预测方法与基于集成计算方法的开式锻焊齿轮的焊接变形预测方法作为对比实验方法,共同进行实验,实施对比分析。并分别用方法1、方法2来表示。本文方法采用方法3代表。分别测试三种实验方法焊接变形量预测中在 X 、 Y 、 Z 三个方向上的预测误差。测试结果如图7所示。

根据图7测试结果,设计方法的预测误差均低于10 mm。且在三种实验方法中,设计方法的预测误差整体最低。方法1的预测误差在 ± 20 mm之间,

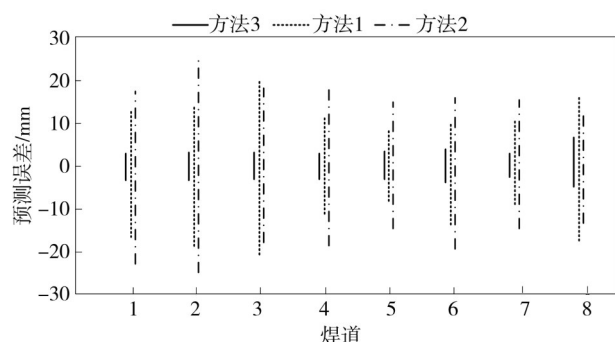


图7 测试结果

Fig. 7 Test results

方法2的预测误差在 ± 24 mm之间,说明通过设计方法能够有效实现建筑钢管混凝土柱焊接变形量预测。具备一定的优势和应用潜力。可以为工程师提供更准确的预测结果,以便在实际建设过程中进行适当的调整和优化,从而控制焊接变形量并确保结构的稳定性和安全性。

3 结论

本研究针对建筑钢管混凝土柱钢框架焊接变形预测,提出了一种基有限元仿真与固有应变理论的预测方法。通过系统建模、工艺模拟与工程验证,得出以下结论:

(1)采用ABAQUS建立的建筑钢管混凝土柱模型,结合韩林海本构模型与钢材双线性随动强化模型,可准确表征焊接热-力耦合行为。

(2)基于Visual-Mesh的焊接网格分组及“生死单元”技术,成功实现了多层多道CO₂焊的过程模拟,温度场分布符合多层多道焊热累积规律。

(3)基于高斯热源模型提取的纵向固有应变、横向固有应变及其固有应力,建立的变形预测模型在X、Y、Z方向的预测误差均低于10 mm,明显优于现有方法。

(4)在某超高层建筑工程中,该方法为焊接顺序优化、预变形设计提供了依据,显著降低了施工调整成本。

(5)本方法通过融合物理机理与数据驱动,解决了传统预测中模型简化过度、热传导耦合缺失等问题。后续将对复杂节点形式及动态施工荷载下的变形预测进行研究。

参考文献:

- [1] 戎贤,石晓娜,陈磊,等. 方钢管混凝土柱梁下栓上焊节点受力性能研究[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(11): 13-24.
RONG X, SHI X N, CHEN L, et al. Mechanical behavior of the bottom flange bolted and top flange welded joints between concrete-filled steel tubular columns and steel beam [J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(11): 13-24.
- [2] 侯超,周晓光. 基于机器学习的矩形钢管混凝土柱偏压承载力预测[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(S1): 155-166.
HOU C, ZHOU X G. Eccentric compression capacity prediction of rectangular CFST columns based on machine learning [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(S1): 155-166.
- [3] 徐丽平. 智能垃圾车箱体结构焊接变形数值预测及控制[J]. 齐齐哈尔大学学报: 自然科学版, 2022, 38(6): 1-7.
XU L P. Numerical prediction and control of welding deformation of intelligent garbage truck box structure [J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2022, 38(6): 1-7.
- [4] 瞿铁,信稳,骆文泽,等. 采用集成计算方法预测开式锻焊齿轮的焊接变形[J]. 机械传动, 2023, 47(3): 124-132.
QU T, XIN W, LUO W Z, et al. Predicting Welding Deformation of Exposed Forged-and-welded Gear by the Integrated Computational Approach [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(3): 124-132.
- [5] 孙强,方荣超,樊宇,等. 基于有限元数值模拟的激光包覆焊焊接变形预测与控制[J]. 电焊机, 2020, 50(4): 116-122.
SUN Q, FANG R C, FAN Y, et al. Deformation prediction and control of laser cladding welding based on finite element numerical simulation [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(4): 116-122.
- [6] 张杨,陈捷狮,周斌,等. 不锈钢薄板激光焊接头变形及预测研究进展[J]. 电焊机, 2023, 53(5): 21-29.
ZHANG Y, CHEN J S, ZHOU B, et al. Research Progress on Deformation and Prediction of Laser Welding Joint of Stainless Steel Sheet [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(5): 21-29.
- [7] 薛建阳,李贺超,陈茜,等. T形截面钢管混凝土异形柱-钢梁框架节点地震损伤试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(2): 129-141.

- XUE J Y, LI H C, CHEN Q, et al. Experimental study on seismic damage of joints with T-shaped CFST columns and steel beams [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(2): 129–141.
- [8] 齐宝欣,刘雪微,任庆新. 截面短长轴比对椭圆钢管混凝土柱抗爆性能影响[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2023, 39(2): 202–210.
- QI B X, LIU X W, REN Q X. Anti-blast Performance of the Ratio of Short and Long Axis of Elliptical Concrete Filled-Steel Tubular Column [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2023, 39(2): 202–210.
- [9] 王振山,冯永建,卢俊龙,等. 不同约束形式的薄壁钢管混凝土柱轴心受压试验及承载力计算[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 18–28.
- WANG Z S, FENG Y J, LU J L, et al. Axial Compression Experiment and Bearing Capacity Calculation of Thin-walled Concrete Filled-steel Tube Columns with Different Restraint Forms [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1): 18–28.
- [10] 周政,甘丹,周绪红. 斜拉肋加劲薄壁方钢管混凝土柱的滞回性能研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(6): 14–25.
- ZHOU Z, GAN D, ZHOU X H. Hysteretic behavior of square thin-walled CFST column stiffened by diagonal ribs [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(6): 14–25.
- [11] 李孝忠,张素梅. 外套钢管加固的钢管混凝土柱轴压力学性能研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 122–130.
- LI X Z, ZHANG S M. Axial Compression Performance and Mechanical Property of CFST Columns Reinforced with Outer Steel Tubes [J]. Industrial Construction, 2022, 52(10): 122–130.
- [12] 李岷昌,姬达仓,邱增美. 内置工字形碳纤维增强复材型材方钢管混凝土柱-钢梁外环盖板节点抗震性能有限元分析[J]. 工业建筑, 2022, 52(9): 170–177+185.
- LI G C, JI D C, QIU Z M. Finite Element Analysis of Seismic Performance of Outer-Ring Cover Plate Joints Between Concrete-Filled Square Steel Tubular Column with Built-in I-Shaped CFRP and Steel Beam [J]. Industrial Construction, 2022, 52(9): 170–177+185.
- [13] 白巨巨,李升才,朱永浦. 焊接环式箍筋约束高强混凝土柱抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 75–84+101.
- BAI J J, LI S C, ZHU Y P. Aseismic performance of high strength concrete columns confined by welded hoop stirrups [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 75–84+101.
- [14] 王超,吴春彪,邵龙潭. 焊接变形预测中基于假定热应变法的弹性有限元建模[J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 111–119.
- WANG C, WU C B, SHAO L T. Development of Elastic Finite Element Model for Predicting Welding Deformation Based on Artificial Thermal Strain Method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(4): 111–119.
- [15] 王振波,何耀洋,颜军,等. 焊接钢榫卯连接装配式混凝土柱抗震性能分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 187–196.
- WANG Z B, HE Y Y, YAN J, et al. Seismic performance analysis of welded steel mortise and tenon joint assembled concrete columns [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2022, 44(2): 187–196.
- [16] 吴波,王辉,刘晓珠. 内置高强角钢的方钢管混凝土柱偏压性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(2): 16–25.
- WU B, WANG H, LIU X Z. Experiment on Eccentric Compressive Behaviors of Square CFST Columns with Built-in High-strength Steel Angles [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(2): 16–25.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>