

粉煤灰建筑壁板结构冲击荷载模拟分析

Simulation Analysis of Impact Load on Fly Ash Building Wall Panel Structure

李国荣¹，刘玉芝²，衷诚³

(1. 杨凌职业技术学院 建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 杨凌工业园区投资创业服务有限公司, 杨凌 712100;
3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 611130)

摘要: 为解决粉煤灰建筑壁板遭受外部冲击后三维重建准确性欠佳的问题, 提出粉煤灰建筑壁板结构冲击荷载模拟分析方法。针对粉煤灰建筑壁板结构, 从 DXF 文件中提取直线等组码数据以获取完整的几何数据, 进而识别建筑构件, 并结合相关规范及布局模式验证与调整识别结果, 消除外部冲击对分析的影响。将 DXF 文件转换为点云数据后, 针对冲击引发的噪声和异常点问题, 通过粗分割和细分割结合的方式获取精准点云数据, 并将其与构件识别结果一同输入 Revit 软件, 通过连接墙体特征点完成冲击荷载模拟分析。结果表明: 该技术能精准识别墙体几何信息及门窗参数; 点云分割值迭代后达 0.85; 重建值低于模拟破坏值, 避免了外部冲击不利影响。所提技术方法为粉煤灰建筑壁板结构安全评估提供了可靠依据。

关键词: 粉煤灰壁板; 冲击荷载; 建筑构件; 点云数据; 点云分割

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 06-0158-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.026

LI Guorong¹, LIU Yuzhi², ZHONG Cheng³

(1. Architectural Engineering Institute, Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China;
2. Yangling Industrial Park Investment and Entrepreneurship Service Co., Ltd., Yangling 712100, China;
3. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 611130, China)

Abstract: To solve the problem of poor accuracy in 3D reconstruction of fly ash building wall panels after external impact, a simulation analysis method for impact load of fly ash building wall panel structure is proposed. For the structure of fly ash building wall panels, extract group code data such as straight lines from DXF files to obtain complete geometric data, identify building components, and verify and adjust the identification results based on relevant specifications and layout patterns to eliminate the influence of external impacts on analysis. After converting the DXF file into point cloud data, precise point cloud data is obtained through a combination of coarse and fine segmentation to address the noise and outlier issues caused by impact. This data is then input into Revit software along with the component recognition results, and impact load simulation analysis is completed by connecting wall feature points. The results shows that this technology can accurately identify the geometric information of walls and the parameters of doors and windows; The value of point cloud segmentation reaches 0.85 after iteration; The reconstruction value is lower than the simulated damage value, avoiding the adverse effects of external shocks.

The proposed technology method provides a reliable basis for the safety assessment of fly ash building wall panel structures.

Key words: fly ash wall panels; impact load; building components; point cloud data; point cloud segmentation

0 引言

对于采用粉煤灰壁板作为填充材料的建筑结构，在遭受外部冲击后，壁板表面会出现凹凸不平的损伤。如何通过数值模拟手段准确表征冲击能量、壁板损伤程度及表面形貌变异三者间的动态耦合关系，是提升粉煤灰建筑壁板结构冲击损伤识别可靠性的关键问题^[1-2]。

目前关于建筑壁板结构稳定性分析已有诸多研究。如在高层建筑方面，王娟^[3]为提高高层建筑壁板结构抗震性，设计其在连续振动下的失稳 BIM 模型，通过软件实现模型转换与管理，分析了连续振动下风致响应得出位移，实现稳定性分析；张艳梅等^[4]针对钢框架壁板受力性能需改善的问题，提出加劲肋壁板，采用动力学分析方法计算位移判断其稳定性。在钢筋混凝土建筑方面，相军^[5]针对钢筋混凝土建筑抗连续震动壁板结构，以 5 层框架建筑壁板结构为例构建有限元模型，分析了其抗连续倒塌能力及柱移除后的结构内力情况；巩建平等^[6]采用模型方法分析密肋复合墙体在竖向荷载下的受力性能，探讨主要参数对轴力分配系数的影响并给出计算值。在复合材料方面，王佩艳等^[7]针对复合材料工字型加筋壁板建立特殊有限元模型，采用二级优化策略进行轻量化设计；张荫等^[8]从全寿命质量控制角度出发，探讨密肋壁板结构关键性问题，表明设计阶段优化墙板外形型号、施工阶段提升人员素质与制定合理方案等对保证工程质量意义重大。此外，在建筑结构稳定性相关研究的拓展领域中，冲击荷载模拟方面也有较多成果。魏永恒等^[9]研究冲击对保温结构建筑抗震性的影响，通过浇筑不同轴压比保温墙试件并模拟地震冲击，发现轴压比为 0.3 的试件损伤更少、承载力更高、协同与塑性性能更优异。邢智权等^[10]结合落锤冲击试验与数值模拟，考察纵筋配筋率等因素对高强钢筋-UHPFRC 梁在冲击荷载作用下动力响应的影响。姚宗健等^[11]针对工业厂房井字梁楼盖振动超限问题，通过缩尺模型试

验研究冲击荷载下其减振效果。付朝江等^[12]设计腹板开孔高强钢梁试件开展落锤冲击试验，探究冲击能量等因素对其抗冲击性能的影响，还通过数值模拟分析不同加劲方式的效果，得出设置加劲肋可提高抗冲击性能且特定加劲方式提升效果更优。张纪刚等^[13]以偏心质量下抵抗冲击荷载的钢桁架为对象，建立有限元模型研究其抗冲击能力并进行参数分析。杨万里等^[14]以化爆试验中的装配式钢结构厂房为研究对象，建立精细化有限元模型模拟化爆冲击过程，获取毁伤模式等并验证计算精准性。黄晓欣等^[15]基于显示动力程序对受连续冲击荷载作用的钢筋混凝土板进行动力响应研究，研究不同钢筋强度等级和板厚对冲击响应的影响。

综合以上分析可知，现有研究虽在建筑壁板结构稳定性分析方法、冲击荷载模拟技术等方面取得显著进展，但针对冲击损伤导致的几何形变与数据噪声耦合效应对三维重建精度的影响研究仍鲜少。因此，通过解析 DXF 文件提取几何数据并识别验证建筑构件，结合点云数据分割去噪处理，将处理后的构件信息与点云数据导入 Revit 完成粉煤灰建筑壁板结构冲击荷载模拟分析。

1 粉煤灰建筑壁板结构重建方法

1.1 基于 DXF 文件建筑数据提取

CAD 的 DXF 文件是 BIM 工作流程中的数据交换载体，其中包含了建筑图形的几何信息、图层、颜色、线型等基本元素，因此通过 DXF 文件提取粉煤灰壁板的数据^[16-17]。

从 DXF 文件中提取数据时，由于数据源本身可能存在不完整或错误，如软件兼容性问题、文件传输错误或人为操作失误等，会使 DXF 文件中的关键数据丢失或损坏，进而影响后续的数据提取与分析工作。针对此难点，提出一种基于 DXF 文件解析与数据校验方法。在 DXF 文件中提取数据的流程如图 1 所示。

研究与应用

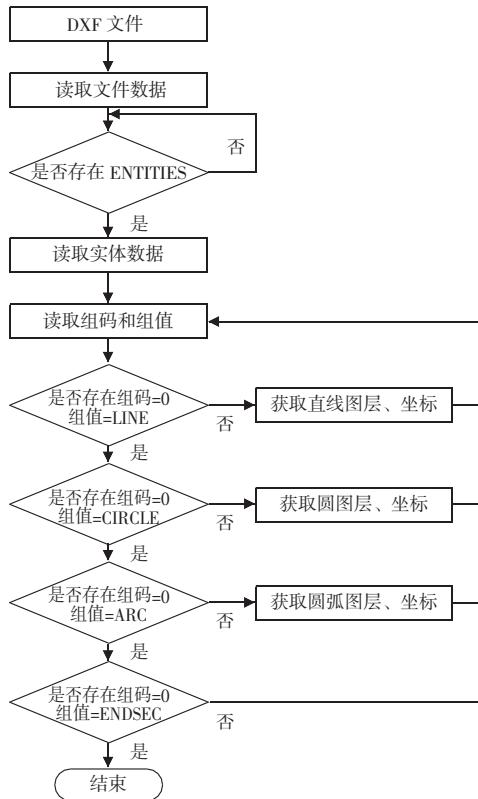


图 1 DXF 文件提取数据的流程

Fig. 1 Process of extracting data from DXF files

通过 DXF 文件解析工具对文件进行初步解析，识别并提取直线、圆、圆弧等几何实体在各图层的关键几何属性数据，再引入数据校验机制，对提取的数据进行完整性、准确性和一致性检查。例如处理涉及粉煤灰建筑壁板的数据时，会着重关注壁板尺寸、位置、连接方式等关键参数，确保数据在提取过程中未因外部冲击出现错误或丢失，一旦发现数据异常，系统将自动触发数据修复或重新提取流程，以保证最终提取的数据准确无误，为后续建筑设计和施工提供可靠数据基础。

1.2 粉煤灰建筑壁板结构识别

通过 DXF 文件提取的数据对建筑结构进行识别，对于建筑设计过程中，相同类型的建筑构件（如门、窗等）通常采用标准化几何形状，而墙体作为非标构件，其几何形态因具体设计需求呈现多样化特征，并无固定形状模式。

墙体是建筑的主体，粉煤灰建筑壁板在建筑中主要充当墙体，并且与门窗等建筑结构相连接。在实际建筑项目中，由于施工环境复杂、设计变更频

繁等因素，可能导致结构数据与原始设计存在偏差，例如施工过程中对墙体位置的误改、设计图纸在传递过程中的信息偏差等，这些外部冲击会导致从 DXF 文件提取的数据与实际数据存在差异，进而影响建筑结构识别的准确性。因此，为了实现粉煤灰建筑壁板三维重建，首先要对墙体进行识别，然后对门窗等进行识别，从而实现建筑整体的识别，确定建筑中的墙体结构区域。根据《建筑制图标准》的要求，直线型的墙体主要有 4 种形式，分别为“一”字型、“L”字型、“T”字型以及“十”字型，且“L”字型、“T”字型以及“十”字型墙体通常夹角为直角。

根据 DXF 文件中提取的数据结果，将直线、圆、圆弧几何实体坐标数据采用链式结构保存。为消除外部冲击导致的数据偏差问题，在识别墙体时，首先找到其中的直线或线段坐标数据，随机选择一个点作为起始点，并顺时针搜索找到线段终点坐标。重复该过程，最后回到起始坐标且迭代次数为大于 4 的偶数时，则初步认为该结构为墙体。但为了进一步确保识别的准确性，在实际操作中还会结合建筑设计规范和常见的墙体布局模式进行验证。例如，在某实际项目中，提取的 DXF 数据中存在一段看似符合墙体特征的线段组合，但通过与建筑设计规范对比，发现该组合在局部角度上与标准墙体夹角存在微小偏差，经过进一步分析，确定这是由于设计图纸在修改过程中未及时更新导致的外部冲击。此时，根据周边墙体的布局和整体建筑结构逻辑，对该线段组合进行了合理调整，最终准确识别出墙体结构。同时将该墙体从链式存储中删除，直至全部墙体识别完毕。

对于门窗这一类具有固定几何结构形状的，根据几何形状结构即可完成建筑结构识别。通过建筑结构识别后即可确定当前建筑中的具体墙体部分。

1.3 粉煤灰建筑壁板结构稳定性三维重建

采用 Autodesk Recap 软件将 CAD 的 DXF 文件转换为点云数据，然后对点云数据进行分割得到相同平面内的点云数据，最后使用 BIM 中的 Revit 软件输入分割后的点云数据^[18]，完成粉煤灰建筑壁板结构三维重建，并根据三维重建后的粉煤灰建筑壁板结构与墙体识别结果匹配确定该建筑中具体使用粉煤

灰建筑壁板的部分。

1.3.1 点云数据分割

点云数据能够精确地反映建筑表面的几何形态, 为后续的三维重建提供数据基础。然而, 在实际应用中, 由于测量误差、环境干扰等因素, 点云数据中可能包含大量的噪声和异常点, 这些噪声和异常点会对后续的点云分割和三维重建造成严重影响, 甚至可能导致结构稳定性的误判。因此, 首先对点云数据使用 RANSAC (随机抽样一致算法) 算法进行粗分割。以粉煤灰建筑壁板中的任意平面为例, 设在该壁板扫描的三维点云数据中的误差点和异常点为 n_b 和 n_c ^[19], 误差点与异常点重合时的概率为:

$$P_1 = \frac{E_{n_c}^3}{E_{(n_c+n_b)}^3} \quad (1)$$

式中: E 为粉煤灰壁板平面的拟合参数。

通过增加分割的迭代次数, 在选取平面中选择三维点云数据中有效点数量最少为 b 时, 得到一个能较好代表所选平面的抽样子集概率为:

$$P_2 = 1 - (1 - \phi^d)^b \quad (2)$$

式中: d 为粉煤灰建筑壁板平面点云数据计算最少数据量; ϕ 为无误差点云数据占总点云数据比例; $P_2 \in (0.9, 0.99)$ 。

由此可以得出 b 值为:

$$b = \frac{\lg(1 - P_2)}{\lg(1 - \phi^d)} \quad (3)$$

当迭代选取的点数量达到或超过拟合该平面所需的最少点数 d 时, 结束迭代, 完成粉煤灰建筑壁板点云数据粗分割。

为了进一步对点云数据进行简化同时提高点云数据精度, 对粗分割后的点云数据使用欧式聚类进行细分分割。

设欧式空间中粉煤灰建筑壁板的平面公式为:

$$Cx + Dy + Ez + F = 0 \quad (4)$$

式中: C, D, F 为欧式空间拟合参数; x, y, z 为点云数据在欧式空间中的坐标。

对粗分割后的剩余粉煤灰建筑壁板三维点云数据中随机选择 k_i 点, 设该点的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 此时的欧式空间内三维平面的间距为:

$$l_i = \frac{|Cx_i + Dy_i + Ez_i + F|}{\sqrt{C^2 + D^2 + E^2}} \quad (5)$$

k_i 点到欧式空间中三维平面最优拟合条件为:

$$\sum_{i=1} l_i^2 = \min \quad (6)$$

通过粗分割与细分分割相结合的策略, 有效减少了点云分割整体所需的计算量, 同时提升了粉煤灰建筑壁板后续三维重建的精准度。

1.3.2 基于 Revit 的粉煤灰建筑壁板三维重建

通过粗细结合的点云数据分割后, 将点云数据输入到 Revit 软件中进行粉煤灰建筑壁板结构三维重建, 具体流程如图 2 所示。

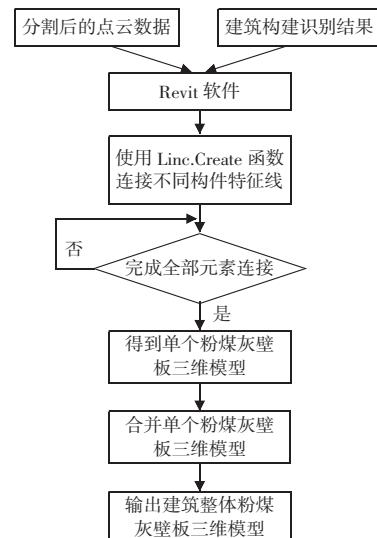


图 2 粉煤灰建筑壁板结构三维重建流程

Fig. 2 Three-dimensional reconstruction process of fly ash building wall panel structure

根据建筑设计结果确定具体墙体为粉煤灰建筑壁板, 在 Revit 中选择 Line. Create 函数, 根据分割的粉煤灰建筑壁板平面的结果, 对各元素特征线进行训练连接, 得到粉煤灰建筑壁板单个面的三维重建模型。同时, 处理由外部冲击导致的结构变形或缺失问题。例如, 在某项目中, 由于施工过程中的意外碰撞, 部分粉煤灰建筑壁板出现了轻微的变形。通过结合点云数据和建筑设计图纸, 在 Revit 中对变形部分进行了精确的修正, 确保了三维重建模型的准确性。不断重复合并三维重建模型得到整个建筑的粉煤灰建筑壁板结构的三维重建结果, 完成三维重建。

2 外部冲击下粉煤灰建筑壁板结构模拟

在粉煤灰建筑壁板施工或使用过程中, 壁板可能遭受车辆撞击、重物坠落等外部冲击。为了准确分析粉煤灰建筑壁板结构性能, 首先在图 3 建筑工地

研究与应用

施工现场, 通过模拟外部冲击下粉煤灰建筑壁板的结构响应, 评估其抗冲击性能, 为壁板的设计、优化和安全评估提供依据。



图3 建筑工地施工现场
Fig. 3 Construction site of a building

模拟采用有限元分析软件 Abaqus 进行。首先, 使用 CAD 软件建立粉煤灰建筑壁板的三维模型并导入软件, 对模型进行网格划分, 选择合适的单元类型与网格密度。在参数设置方面, 对于粉煤灰建筑壁板, 结合实际材料性能, 设定弹性模量为 25 GPa, 泊松比为 0.2, 密度为 1800 kg/m^3 , 抗压强度为 15 MPa, 抗拉强度为 3 MPa; 冲击物假设为质量 500 kg 的重物, 以 5 m/s 的速度垂直撞击壁板, 形状设定为半径 0.3 m 的圆柱体。边界条件上, 固定壁板的底部和两侧, 以模拟其在实际建筑中的约束状态, 同时在壁板的冲击面上设置接触条件, 来模拟冲击物与壁板之间的相互作用。冲击载荷根据冲击物速度和质量, 计算得出冲击力大小约为 12 500 N, 作用时间设定为 0.05 s, 将冲击力以载荷步形式施加到壁板的冲击面上。之后提交求解任务, 待计算完成后, 对结果进行后处理, 提取壁板的应力、应变、位移数据, 见表 1, 进而分析壁板的抗冲击性能, 评估其是否满足设计要求。

表 1 试验设置了三种不同的外部冲击场景来模拟粉煤灰建筑壁板所受冲击情况, 分别是: 一辆小型货车 (质量 1 000 kg) 以 8 m/s 的速度垂直撞击壁板; 一个重物 (质量 800 kg) 从 5 m 高处自由落体撞击壁板; 一辆大型叉车 (质量 1 500 kg) 以 6 m/s 的速度撞击壁板。壁板尺寸为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 。在三种不同的冲击场景下, 壁板在冲击面中心区域的最大应力值均远超设定的抗拉强度 3 MPa, 这表明壁板在冲击面中心区域都会出现裂缝甚至严重破坏。最大应变值在冲击面中心区域边缘均达到较高水平,

说明该区域会发生塑性变形。最大位移值在冲击面中心区域也较为显著, 壁板会出现明显凹陷。由以上结果可知, 在建筑壁板结构施工中要综合考虑外部冲击影响。

表 1 外部冲击下粉煤灰建筑壁板结构模拟结果
Table 1 Simulation results of fly ash building wall panel structure under external impact

冲击场景	指标	冲击面中心区域	冲击面边缘区域	壁板边缘区域
1	最大应力值/MPa	18.5	12.3	4.2
	最大应变值/($\times 10^{-3}$)	2.8	1.9	0.6
	最大位移值/mm	12.5	8.3	2.1
2	最大应力值/MPa	16.2	10.8	3.5
	最大应变值/($\times 10^{-3}$)	2.5	1.7	0.5
	最大位移值/mm	10.2	6.8	1.8
3	最大应力值/MPa	22.3	14.5	5.1
	最大应变值/($\times 10^{-3}$)	3.2	2.2	0.7
	最大位移值/mm	15.6	10.2	2.6

外部冲击会影响粉煤灰建筑壁板结构的稳定性。当其不稳定时, 此时获取的重建基础数据也会存在偏差, 影响重建效果。因此, 为验证所提技术方法在粉煤灰建筑壁板遭受外部冲击情况下, 对建筑构件进行结构识别与三维重建的效果。通过模拟一辆质量为 1 200 kg 的工程车辆以 7 m/s 的速度撞击粉煤灰建筑壁板 (壁板尺寸为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$) 这一外部冲击场景, 利用有限元分析软件获取冲击后的模拟数据, 包括壁板各区域的应力、应变和位移情况。同时, 运用所提技术方法对模拟场景中的建筑构件进行识别, 并完成三维重建。将模拟结果与重建结果进行对比, 见表 2。

表 2 模拟结果与重建结果一致性分析
Table 2 Consistency analysis between simulation results and reconstruction results

指标	冲击面中心区域		冲击面边缘区域		壁板边缘区域	
	模拟值	重建值	模拟值	重建值	模拟值	重建值
最大应力值/MPa	20.5	3.2	13.8	2.8	4.8	1.1
最大应变值/($\times 10^{-3}$)	3.0	0.5	2.1	0.4	0.7	0.1
最大位移值/mm	14.2	2.5	9.5	1.8	2.3	0.5

由表 2 可知, 从模拟结果来看, 在外部冲击作用下, 壁板各区域均受到了较大影响。冲击面中心区域的最大应力值达到 20.5 MPa, 远超壁板的抗拉强度 3 MPa, 这表明该区域在冲击下会出现严重破坏; 最大应变值为 3.0×10^{-3} , 说明该区域边缘发生了明显的塑性变形; 最大位移值为 14.2 mm, 会导致壁板

出现明显的凹陷。冲击面边缘区域和壁板边缘区域也受到了一定程度的影响,但相较于冲击面中心区域,影响程度较小。然而,通过所提技术方法进行三维重建后,重建结果与模拟结果存在显著差异,重建值显著低于模拟值,说明所提方法在重建过程中未能完全还原冲击造成的结构响应,需进一步优化模型以提升对冲击效应的模拟能力。冲击面中心区域的最大应力值重建值为3.2 MPa,最大应变值为 0.5×10^{-3} ,最大位移值为2.5 mm;冲击面边缘区域和壁板边缘区域的相应指标重建值也均远小于模拟值。这表明所提技术方法在三维重建过程中,通过精准的建筑构件识别和数据处理,最大程度地避免了外部冲击带来的不利影响。综上可知,所提技术方法能够准确识别建筑构件的几何信息和结构特征,在重建过程中对受损区域进行了合理的修复和优化,使得重建后的壁板结构在应力、应变和位移等方面均保持在较为稳定的范围内,实现了建筑壁板结构的稳定性重建。这为后续的结构分析和安全评估提供了可靠的依据,证明了所提技术方法在应对外部冲击情况下的有效性和可靠性。

3 结论

粉煤灰建筑壁板结构冲击荷载模拟方法,有效解决了外部冲击导致的壁板表面损伤、原始数据失真对三维重建准确性的影响。通过在数据提取、处理、点云分割及三维重建等环节的创新性方法,能够在外部冲击干扰下准确分辨建筑构件、高效分类点云数据、去除干扰信息、减少计算量并提升对复杂点云数据的处理能力,精准呈现粉煤灰壁板的位置和大小等数据。即使在建筑结构因外部冲击发生变化时,该技术也能最大程度降低不利影响,对受损区域进行合理修复优化,实现建筑壁板结构冲击荷载模拟分析。研究成果为粉煤灰建筑壁板结构在复杂环境下的结构分析和安全评估提供了可靠依据,具有重要的工程应用价值和理论意义,有助于推动建筑结构健康监测与安全管理技术的发展。

参 考 文 献

- [1] 王新妮, 吴海波. 钢筋混凝土建筑在连续震动下的壁板结构破坏程度分析 [J]. 地震工程学报, 2017, 39 (6): 1018–1023.
- [2] 马静, 黄炜, 姚谦峰. 密肋壁板结构中复合墙体的竖向承载力及稳定性研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2007 (2): 187–192, 223.
- [3] 王娟. 高层建筑在连续振动下的壁板结构失稳定 BIM 模型设计 [J]. 地震工程学报, 2018, 40 (3): 413–420.
- [4] 张艳梅, 刘敏. 钢框架加劲肋壁板结构的受力失稳性能研究 [J]. 地震工程学报, 2020, 42 (1): 32–37.
- [5] 相军. 钢筋混凝土建筑抗连续震动壁板结构分析 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (32): 283–287.
- [6] 巩建平, 王立彬. 民用建筑中密肋壁板结构梁的受力问题分析 [J]. 经济技术协作信息, 2009 (29): 79–79.
- [7] 王佩艳, 岳春霞, 耿小亮, 等. 基于层合参数的工字型加筋壁板稳定性设计 [J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37 (6): 889–895.
- [8] 张荫, 李慧民, 姚谦峰. 密肋壁板结构全寿命质量控制分析 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2007, 39 (4): 474–478, 484.
- [9] 魏永恒, 叶长青, 黄军福, 等. 冲击对保温结构建筑抗震性的影响 [J]. 工程与建设, 2023, 37 (6): 1756–1759.
- [10] 邢智权, 张威威, 聂仁杰, 等. 冲击荷载作用下高强钢筋-UHPFRC 梁动力响应研究 [J]. 土木工程学报, 2025, 58 (5): 27–40.
- [11] 姚宗健, 张宇轩, 张林, 等. 冲击荷载作用下井字梁楼盖的减振加固试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2025 (1): 70–76.
- [12] 付朝江, 黄建忠, 罗才松, 等. 冲击荷载作用下腹板开孔高强钢梁的抗冲击性能研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (9): 11–20.
- [13] 张纪刚, 时成龙, 闫清峰, 等. 钢桁架在冲击荷载作用下的动态响应研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26 (10): 48–56.
- [14] 杨万里, 张宁, 蒋冬启, 等. 装配式钢结构厂房化爆冲击毁伤效应数值仿真研究 [J]. 防护工程, 2024, 46 (4): 13–21.
- [15] 黄晓欣, 刘宇航, 邓嘉瑞, 等. RC 板在连续冲击下的数值模拟研究 [J]. 工业安全与环保, 2025, 51 (1): 15–19.
- [16] 赵洪海, 马梦琪, 孟文芳, 等. 基于 BIM 技术大型机电安装工程研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (3): 125–131.
- [17] 陈军, 房朝君, 柯凌云, 等. 基于 BIM 模型的装配式建筑混凝土梁柱墙连接节点稳定性分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 87–91.
- [18] 曹谦, 胡晓, 李东声, 等. 多预制构件点云数据分割与识别算法 [J]. 土木工程与管理学报, 2023, 40 (4): 57–64.
- [19] 康来, 万珊珊, 魏迎梅. 基于三维重建的物体空间数据合成增广方法 [J]. 计算机仿真, 2024, 41 (10): 153–158.