

冲击回波法结合 AI 在套筒灌浆检测中的应用

吴波涛^{1,2}, 于洪江^{2,3}, 杨经纬⁴, 张远军¹, 刘荣芳¹

(1. 四川升拓检测技术股份有限公司, 自贡 643000;

2. 装配式建筑重庆市高等职业技术学院应用技术推广中心, 重庆 400072;

3. 重庆建筑工程职业学院, 重庆 400072;

4. 重庆中建海龙两江建筑科技有限公司, 重庆 404100)

摘要: 为研究冲击回波法在套筒灌浆质量检测中的可行性和适用性, 对冲击回波法进行理论分析和试验研究。结果表明冲击回波法能较好地应用于套筒灌浆密实度的检测。通过实际工程进行验证, 进一步证明了冲击回波法在套筒灌浆检测中具有良好的应用前景。在试验和实际工程中发现, 套筒直径、埋深和边界等易对检测结果造成影响, 提出采用人工智能(AI)的辅助检测方法来优化上述影响, 提高了缺陷检出率。

关键词: 装配式建筑; 冲击回波法; 套筒灌浆; 人工智能

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-6656(2023)03-0039-06

Application of impact echo method combined with AI in sleeve grouting detection

WU Botao^{1,2}, YU Hongjiang^{2,3}, YANG Jingwei⁴, ZHANG Yuanjun¹, LIU Rongfang¹

(1. Sichuan Central Inspection Technology Inc., Zigong 643000, China;

2. Prefabricated Construction Application Technology Extension Center of Chongqing Higher Vocational and Technical College, Chongqing 400072, China; 3. Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China;

4. Chongqing China State Hailong Liangjiang Construction Technology Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

Abstract: In order to study the feasibility and applicability of the impact echo method in the quality inspection of sleeve grouting, theoretical analysis and experimental research were carried out on the impact echo method. The results show that the impact echo method can be well applied to the detection of sleeve grouting compactness. Through the verification of the actual project, it is further confirmed that the impact echo method has a good application prospect in the detection of sleeve grouting. It is found in experiments and practical projects that the diameter, buried depth and boundary of the sleeve are easy to affect the detection results. An artificial intelligence (AI) aided detection method is proposed to optimize the above effects to improve the defect detection rate.

Key words: prefabricated building; impact echo method; grouting of sleeve; artificial intelligence

装配式建筑作为建筑工业化的重要产物, 具有良好的节能环保性而应用广泛。其最常用的节点连接方式是套筒连接, 钢筋间的应力是通过套筒内的

灌浆料进行传递的, 而良好的灌浆质量才能保证钢筋连续、可靠地传力, 进而充分发挥结构的抗震性能和抗剪性能。

标准 JGJ 1—2014《装配式结构技术规程》要求钢筋套筒连接灌浆应密实饱满, 且应全数检测。标准 JGJ/T 485—2019《装配式住宅建筑检测技术标准》对检测方法及不同方法的抽检比例作了详细规定。冲击回波检测法具有高效、成熟和无损等优点, 在行业内得到了广泛的关注。为研究冲击回波法在套筒灌浆质量检测中的可行性和适用性, 对冲击回波法进

收稿日期: 2022-06-15

基金项目: 重庆中建海龙 2020 年科技研发课题(2020CQHL002); 重庆市高等职业教育教学改革研究项目(Z213195); 重庆建筑工程职业学院科研项目(JG-KJ-2019-001)

作者简介: 吴波涛(1992—), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事土木工程检测工作

通信作者: 吴波涛, wubt@scentralit.com

行理论分析和试验研究,并提出采用人工智能(AI)的辅助检测方法,以提高套筒灌浆缺陷的检出率。

1 套筒结构及现有检测方法

套筒连接是在金属套筒中插入单根带肋钢筋并注入灌浆料拌合物,通过拌合物硬化形成整体并实现传力的钢筋对接连接。套筒分类主要包含半灌浆套筒和全灌浆套筒,其结构如图 1 所示。

套筒灌浆密实度的检测方法主要有预埋钢丝拉拔法、预埋传感器法、X 射线成像法、内窥镜法、局部破损法和冲击回波法等,其概述如表 1 所示。

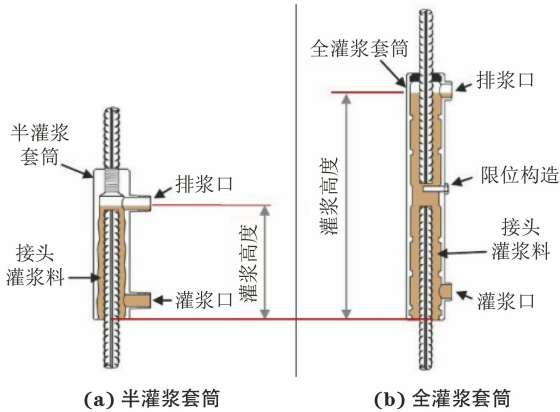


图 1 套筒结构示意图

表 1 套筒灌浆密实度检测方法概述

时间	方法名称	概述
灌浆过程中	预埋钢丝拉拔法	根据极限荷载判定,锚固段状态与长度对结果影响大,客观性不强,存在破损可能
	预埋传感器法	根据能量衰减判定,传感器位置对结果影响大,判定阈值需制作平行试件标定,增加施工成本,不便大量使用
灌浆后	X 射线成像法	基于射线衰减原理,结果直观、可靠,存在辐射危险,成本较高
	内窥镜法	基于光学摄像原理,结果直观、可靠,破损检测
	局部破损法	结果直观、可靠,破损检测
	冲击回波法	基于弹性波反射原理,结果直观,无损检测,受弹性波性质影响较大

2 冲击回波法检测原理

2.1 冲击回波法原理

冲击回波法是通过瞬时的力学冲击产生瞬时应力波,应力波在弹性结构中传播,被缺陷和构件底面反射回来(见图 2),对这些包含结构信息的反射波信号进行分析可判断结构是否完好。

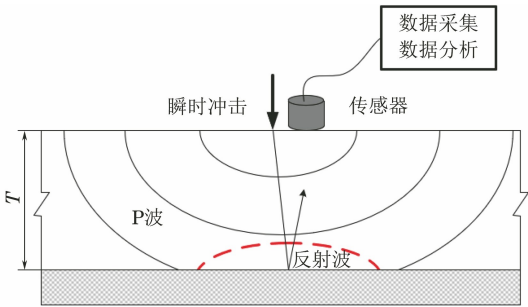


图 2 冲击回波法检测原理示意

如图 2 所示,应力波(常用 P 波)在结构的激振面和底面之间重复反射,设 P 波在该结构中传播波速为 V_p ,则一个来回的传播时间 Δt 为

$$\Delta t = 2T/V_p \tag{1}$$

式中: T 为结构厚度; V_p 为 P 波的传播速度。

通过传感器接收应力波在结构中的振动信号,信号频率为

$$f = V_p/2T \tag{2}$$

式中: f 为对应板底反射信号的频率。

P 波的频域特性包含了结构内部的信息,通过分析该特性,即可评估结构的质量^[1]。

2.2 套筒灌浆冲击回波法检测原理

理论上简单地将套筒的灌浆状态分为密实、不密实和完全未灌浆等 3 种状态,则 P 波在剪力墙中的传播有 3 种情况:① 灌浆密实时,波在剪力墙中透过套筒后在墙底部反射,其传播时间与在正常混凝土中的传播时间基本无异;② 灌浆不密实时,波在套筒顶部发生反射,其传播时间较在正常混凝土中的传播时间短,或透过套筒在墙底部发生反射,由于浆料不饱满,其传播时间较在正常混凝土中的传播时间长;③ 完全未灌浆,波在套筒顶部发生反射,传播时间较在正常混凝土中的时间短,或绕过套筒在剪力墙底部反射,传播时间较正常混凝土中的时间长^[2-3]。

P 波在不同灌浆情况下的传播如图 3 所示。

为了体现传播时间的差别,需要在灌浆饱满的套筒处(一般用密实混凝土代替)进行标定。常见的实施方式为:在套筒灌浆密实度测试前,在套筒正上方 20 cm 处进行标定工作(为消除随机误差,测试 3 个点),后延套筒轴线进行逐点测试(见图 4)。

2.3 频谱分析技术

在频谱分析技术中,最常用的为高速傅里叶分

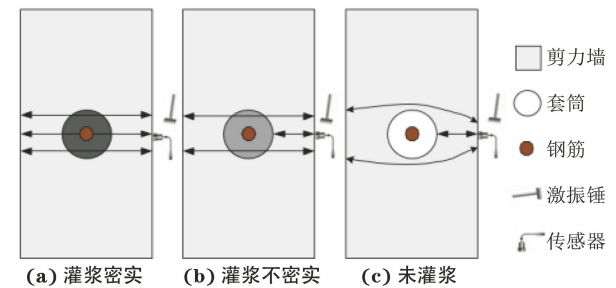


图 3 P 波在不同灌浆情况下的传播示意

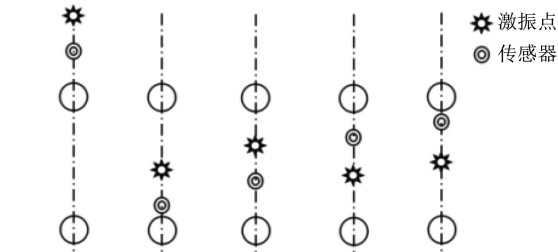


图 4 套筒密度测试标定点分布示意

析(FFT),其分辨率(Δf)为

$$\Delta f = f_{k+1} - f_k = 1/(N\sigma_t) \quad (3)$$

式中: N 为采样点数; σ_t 为采样间隔; f_k 为第 k 个采样点的 FFT 变换值。

据式(3)可知,采样间隔越小,分辨率越高,但采样点数越多,分辨率反而越低。

在套筒检测中,套筒直径一般较小(数厘米),采样需满足高采样点和高采样频率,以获取更好的拟合波形,FFT 频谱分辨能力往往不能满足要求。最大熵(MEM)频谱分析方法具有频谱分辨率高,适用于非正弦信号的特点,所以在分析中,更多使用 MEM 分析方法^[4]。

3 室内模型试验

在某装配式套筒生产基地,制作了一批剪力墙构件,剪力墙厚度为 0.2 m,混凝土强度为 C30,设计参数如表 2 所示,结构如图 5 所示。

表 2 剪力墙模型设计参数

位置编号	套筒型号	埋置深度/cm	灌浆程度/%
4-1 [#]	GT25	10	0
4-2 [#]			50
4-3 [#]			80
4-4 [#]			100
6-1 [#]	GT25	5	0
6-2 [#]			50
6-3 [#]			80
6-4 [#]			100
7-1 [#]	GT16	10	50
7-2 [#]	GT20		
7-3 [#]	GT25		
7-4 [#]	GT28		

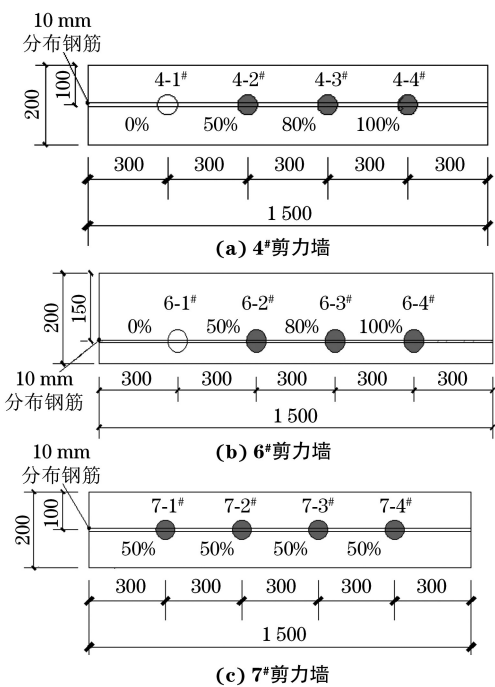


图 5 混凝土剪力墙结构示意

使用冲击回波法对制作的构件进行检测后,通过最大熵法(MEM)频谱分析技术进行数据分析,检测结果如图 6~8 所示。

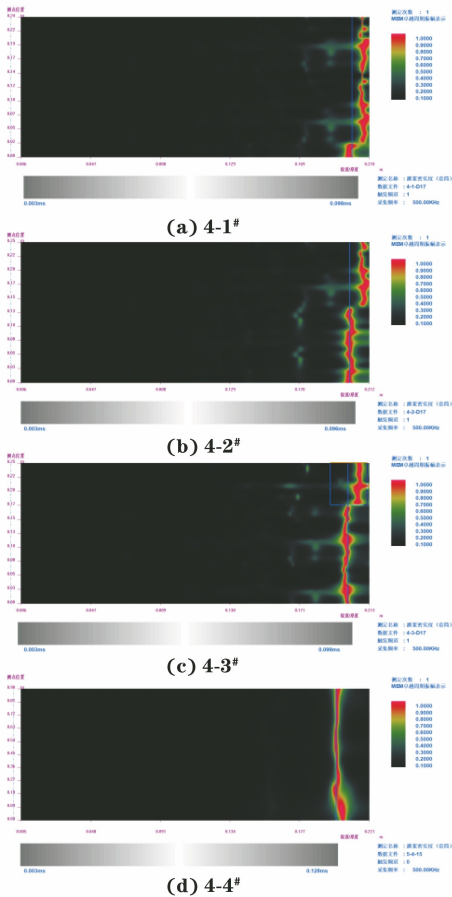


图 6 4[#] 构件冲击回波法检测结果

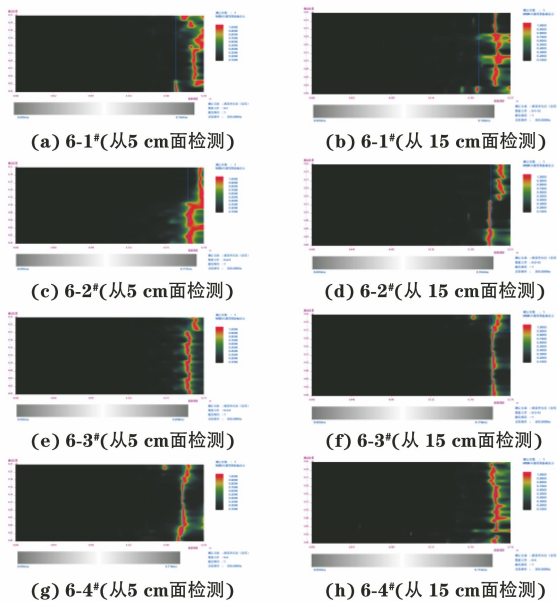


图 7 6# 构件冲击回波法检测结果

为验证冲击回波法在现场的实用情况,在某装配式建筑项目中对在建装配式剪力墙套筒灌浆密度进行冲击回波法检测。该墙体厚度为 0.2 m,混凝土设计强度为 C35,检测结果如图 9 所示。为增强检测结果的辨识度,使用波速图进行结果展示。检测后进行了钻孔验证,使用内窥镜进行拍照取证,检测波速图与实际情况一致,进一步证明了冲击回

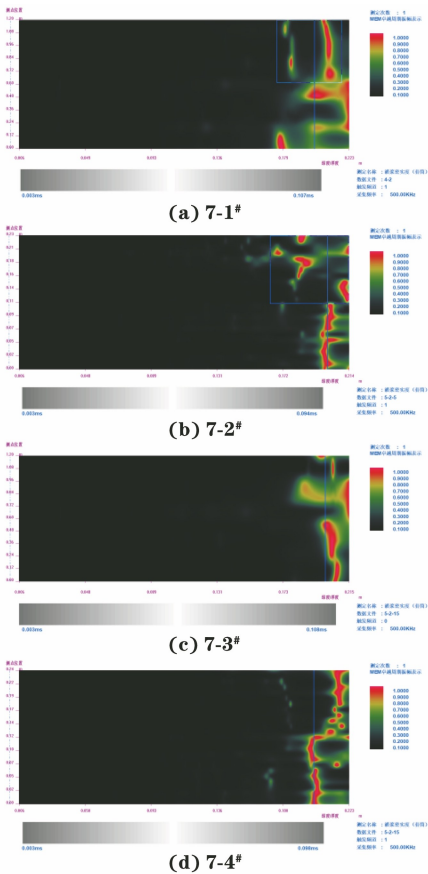


图 8 7# 构件冲击回波法检测结果
波法在套筒灌浆检测中具有良好应用前景。



(a) 未灌浆检测波速图



(b) 未灌浆内窥镜照片



(c) 灌浆密实检测波速图



(d) 灌浆密实内窥镜照片

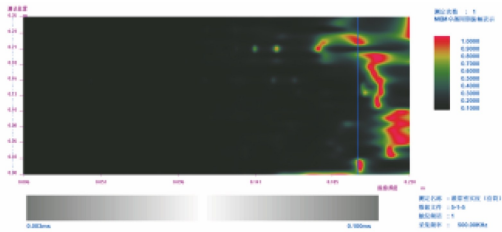
图 9 实体结构冲击回波法检测及验证结果

4 适用性分析

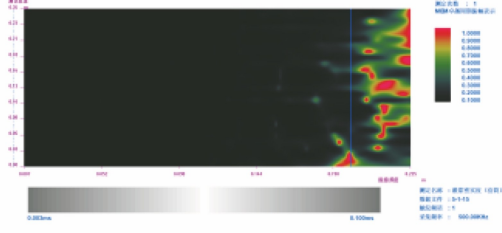
在室内模型试验和现场应用中发现套筒外径、套筒埋置深度和边界条件等因素易对检测结果产生影响。

4.1 影响因素分析

在相同工况且完全未灌浆时,设定埋置深度为 5 cm 和 15 cm 的两种套筒,其检测结果如图 10 所示,可见,埋置深度为 5 cm 套筒的检测结果更佳。

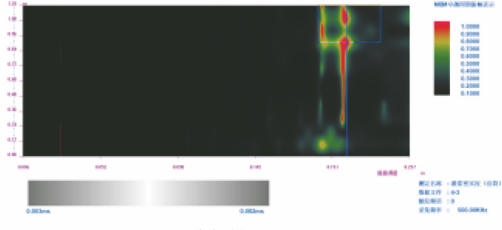


(a) 5 cm

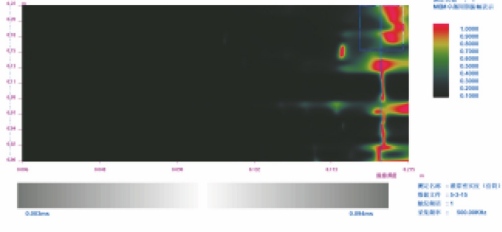


(b) 15 cm

图 10 不同埋置深度套筒的冲击回波法检测结果
在相同工况和灌浆情况(80%饱满度)下,设定不同的套筒型号(外径),其检测结果如图 11 所示,可见,套筒外径越大,检测效果越好。



(a) 40 mm



(b) 42 mm



(c) 50 mm



(d) 56 mm

图 11 不同外径套筒的冲击回波法检测结果

边界对套筒冲击回波法检测结果的影响如图 12 所示(边界为 2 cm,灌浆密实),检测结果出现延后(0.009 ms)。

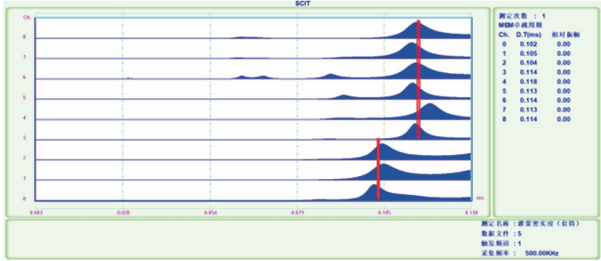


图 12 边界对套筒冲击回波法检测结果的影响

4.2 适用性分析

根据研究,缺陷长度(b)和埋置深度(d)关系不同时的检测情况(见图 13)如下:① 当 $b/d < 0.3$ 时,冲击回波法难以检测出缺陷;② 当 $0.3 < b/d < 1.5$ 时,可检测出缺陷反射及结构底部的反射(双频峰);③ 当 $1.5 < b/d$ 时,可检测出缺陷的提前反射(单频峰),但难以检测出结构底部反射。

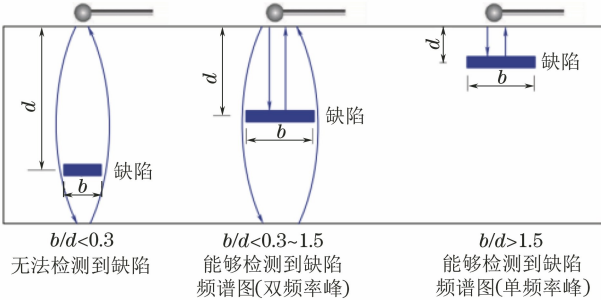


图 13 缺陷长度与埋置深度关系不同时的检测情况

对于埋置深度为 5 cm 的套筒,理论可检出的最小套筒灌浆缺陷长度为 1.5 cm;对于埋置深度为 10 cm 的套筒,理论最小可检出套筒缺陷长度为 3 cm;对于埋置深度为 15 cm 的套筒,理论最小可检出套筒灌浆缺陷长度为 4.5 cm。

在实际工程中,套筒存在边界,会对检测结果产生影响,引入人工智能解决这一问题,检测时还需注意不同激振锤产生的 P 波频率不同,也会对缺陷检出有影响。

5 人工智能(AI)的应用

为提升冲击回波法方法的适用性及缺陷检出率,解决一些原有技术无法解决的问题,在原有的分析方法基础上增加人工智能(AI)分析方法。该方法实现逻辑为:① 以实体工程为样本库,前期建立大量验证数据库(下述数据统计以南京某装配式项目为例,样本库约千条数据,见表 3, F 值为综合评

价指标);② 对数据进行标记;③ 将标记的数据提取特征参数后进行训练,特征参数包括边界条件、套筒直径、埋深、多阶频谱特性、标定波速和检测波速等,训练模型包括二层贝叶斯网络和人工神经元网络分析模型;④ 将现场检测数据直接上传至云端,由人工智能模型进行自动分析并反馈结果。

表 3 样本数据人工智能训练验证情况

模型	验证方法	准确率/%	精度/%	再现率/%	F 值
贝叶斯网络	全部训练	90.4	90.2	90.4	0.902
(二层)	交叉训练	88.0	87.7	88.0	0.876
人工神经	全部训练	98.0	98.0	98.0	0.980
元网络	交叉训练	86.0	85.6	86.0	0.856

为验证人工智能(AI)的分析能力,对该项目进行开孔验证,验证结果如图14所示。分析发现,AI分析结果、冲击回波法检测波速图和开孔验证结果



(a) 冲击回波法波速图



(b) 内窥镜照

图 14 AI 应用案例的验证结果

一致,证明了 AI 分析方法适用于套筒灌浆密实度检测。

需要注意的是,模型的泛化能力对 AI 的判定准确度有较大影响,对于无训练集的地区或项目,宜建立相对应的训练集,以达到适用目的。

6 结语

(1) 冲击回波法作为一种成熟、高效的检测方法,在装配式建筑套筒灌浆密实度检测中具有良好的应用前景。

(2) 应用冲击回波法检测时,应注意套筒直径(缺陷大小)与埋置深度对缺陷检出率的关系。

(3) 冲击回波法检测时易受边界条件、埋置深度和缺陷大小等因素影响,通过人工智能(AI)分析方法,可进一步优化上述影响,提高冲击回波法的检测精度和缺陷检出率。

(4) 应用人工智能(AI)分析方法时,需注意模型的泛化能力,宜根据各地方或项目建立训练集。

参考文献:

[1] 吴佳晔,杨超,季文洪,等. 预应力管道灌浆质量检测方法的现状和进展[J]. 四川理工学院学报,2010,23(5): 500-503.

[2] 吕小彬,吴佳晔,李秀琳,等. 冲击回波法测试混凝土试件弹性波波速研究[J]. 水利水电技术,2015,3(46): 84-90.

[3] 赵仲杰,顾盛,潘永东. 装配式建筑浆锚连接质量的冲击回波等效波速法检测试验[J]. 无损检测,2020,42(6):36-40.

[4] 吴佳晔,刘秀娟. 预应力孔道检测技术的现状与发展[J]. 市政技术,2013,4(7):17-22.

(上接第 21 页)
测可快速查找反应堆水池不锈钢覆面焊缝的表面和近表面缺陷,验证了该技术在该领域的应用可行性。

参考文献:

[1] 操丰,王建军,丁有元. 核电站水池不锈钢覆面泄漏检测及其焊接修复技术[J]. 机械制造文摘(焊接分册),

2010(5):5-10.

[2] 何庆琼,于海峰,刘予. 核电换料水池不锈钢覆面泄漏的氦检[J]. 无损检测,2018,40(9):44-47.

[3] 马冰洋,黄桂林,杨泽榕. 焊缝涡流检测技术研究进展及应用[J]. 西部特种设备,2020,3(2):22-26.

[4] 汤祺,冯搏,杨芸,等. 表面粗糙度对涡流检测的影响[J]. 无损检测,2016,38(3):47-51.