

DOI: 10.7672/sgjs2025210037

钢结构错边焊缝内部缺陷检测试验研究*

陈玲珠, 吴小立, 李向民, 肖顺, 石昊

(上海市建筑科学研究院有限公司上海市工程结构安全重点实验室, 上海 200032)

[摘要] 焊缝错边是钢结构工程常见的施工质量缺陷, 现有研究和验收标准提出的焊缝内部缺陷检测方法可较好地检出于错边焊缝内部缺陷, 对于错边焊缝内部缺陷检测的适用性和效果缺乏试验验证。设计制作4个预设不同焊缝缺陷的错边焊缝试件, 缺陷类型包括气孔、夹渣、未熔合、裂纹和未焊透, 同时考虑不同的缺陷大小和位置, 分别采用超声波法、相控阵超声波法和X射线法对焊缝内部缺陷进行检测试验, 对比分析不同检测方法对错边焊缝内部缺陷检测的有效性。研究表明, 相控阵超声波法能较好地检出焊缝缺陷, 可对缺陷面状和体状进行有效识别, 能为构件承载力削弱影响程度定量分析提供参考; 超声波法在缺陷检出上存在一定难度, 存在误判可能; X射线法能很好地检出焊缝缺陷, 但无法检测缺陷深度及高度, 且存在辐射污染问题。

[关键词] 钢结构; 错边焊缝; 缺陷; 检测; 超声波法

[中图分类号] TU391

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)21-0037-05

Experimental Study on Internal Defect Testing of Misalignment Weld of Steel Structure

CHEN Lingzhu, WU Xiaoli, LI Xiangmin, XIAO Shun, SHI Hao

(Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Weld misalignment is a common construction quality defect in steel structures. The testing methods for internal defects in welds proposed in existing studies and acceptance standards can effectively detect the internal defects of welds without misalignment, while their applicability and testing effect for internal defect detection in misalignment welds lack experimental verification. Four misalignment weld specimens with different types of preset weld defects, including porosity, slag inclusion, incomplete penetration, cracks, and incomplete fusion, were designed and fabricated. The weld defects with different sizes and positions were considered as well. The internal defects of welds were detected using ultrasonic testing, phased array ultrasonic testing, and X-ray testing. The effectiveness of different non-destructive testing methods for detecting internal defects in misalignment welds was compared and analyzed. The research results show that phased array ultrasonic testing has a good detection effect on weld defects, the surface and body shapes of defects can be effectively recognized, which can provide references for quantitative analysis of the degree of load-bearing weakening of members. Ultrasonic testing has certain difficulties in defect detection and the possibility of misjudgment. X-ray testing can effectively detect weld defects, but it cannot detect the depth and height of defects, and there is a problem of radiation pollution.

Keywords: steel structures; misalignment welds; defects; testing; ultrasonic method

* 上海市科学技术委员会课题(22dz1201703); 上海市自然科学基金(22ZR1427900, 22ZR1453700)

[作者简介] 陈玲珠, 博士, 正高级工程师, E-mail: 20040392chen@163.com

[通信作者] 李向民, 博士, 教授级高级工程师, E-mail: lxm_sribs@163.com

[收稿日期] 2025-06-15

0 引言

焊接是目前钢结构主要连接方式之一, 已广泛应用于工业、民用、大型公共建(构)筑物及市政交通桥梁之中。焊接质量好坏直接影响结构安全, 是钢结构工程施工质量现场检测最重要的内容。而

焊缝错边是钢结构工程项目中常见的施工质量缺陷^[1],易造成焊缝处明显的应力集中,对钢构件及钢结构整体安全性能产生较大影响^[2-3]。对于新建钢结构工程,验收标准要求焊缝错边量超标的工程进行重焊,然而,对于既有钢结构工程,由于不具备相应重新切割施焊条件,焊缝重焊成本和代价相对较高,还需结合错边量和焊接质量进行综合评估。受焊接过程不同参数稳定性的影响,钢结构焊接过程中易出现裂纹、夹渣、气孔、漏焊、烧穿、咬边、未熔合等内部缺陷^[4-5],在钢结构使用过程中会引发应力集中,以致构件开裂失稳。目前,通常采用超声波法和X射线法检测焊缝内部缺陷;对于焊缝表面和近表面的缺陷,检测方法通常包括目视检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测。现阶段实际钢结构工程缺陷检测中,主要以超声波检测为主,磁粉和渗透检测为辅^[5-6]。GB 50205—2020《钢结构工程施工质量验收标准》和GB 50661—2011《钢结构焊接规范》对钢结构焊接质量检测提出了详细要求。近年来,除传统的焊缝检测方法外,不同学者提出了相控阵超声波法和视觉检测法^[7-11],其中相控阵超声波法具有缺陷检出率高、操作便捷、无危害性等优点,适用于钢结构焊缝内部缺陷检测。黄圣超^[12]和魏明贤^[13]提出了基于线结构光的焊缝表面缺陷自动识别系统,可显著提升检测效率。马中军等^[14]提出了结合BIM技术与表面图像分析的钢结构无损检测方法,可提升钢结构无损检测精度。Dhruva等^[15]提出了基于视觉检测的智能缺陷识别算法,可基于焊缝图像自动准确识别焊缝缺陷。

现有研究和验收标准中提出的焊缝内部缺陷检测方法如超声波法、相控阵超声波法、X射线法等可较好地检测焊缝内部缺陷,但主要针对无错边的焊缝,对于错边焊缝内部缺陷检测的适用性和检测效果尚缺乏试验验证。闫留青^[16]研究了单面焊对接环焊缝中由错边引起的根部超声回波特征,对超声回波类型进行了分析,并指出错边焊缝根部的超声回波较复杂。

基于以上背景,本研究设计制作了一系列预设不同焊缝缺陷的错边焊缝试件,对比分析了3种无损检测方法(超声波法、相控阵超声波法和X射线法)对于错边焊缝内部缺陷检测的有效性和优缺点,并提出了适用于错边焊缝的内部缺陷检测技术。

1 试件设计

采用2块截面尺寸为300mm×150mm×12mm的钢板对接焊接,错边量为2mm。焊缝采用V形坡口焊,焊接方式采用氩弧焊+手工电弧焊,试件钢板钢

材为Q355。

根据实际工程中常见焊缝缺陷情况,设置5种典型焊缝缺陷类型,包括气孔、夹渣、未熔合、裂纹和未焊透,缺陷宽度取2,4,6mm,缺陷长度分别按20,30mm设置,缺陷分别设置在裂缝上表面、中部及下表面等位置。共设计制作4个试件,预设15个焊缝缺陷,如表1和图1~4所示。

表1 试件设计

Table 1 Specimen design

试件编号	缺陷编号	缺陷类型	缺陷宽度/mm	缺陷长度/mm
JMHS-221224	1	气孔	2	20
	2	气孔	4	20
	3	条状夹渣	6	20
	4	气孔	6	20
JMHS-221225	5	条状夹渣	2	20
	6	条状夹渣	4	20
	7	根部坡口未熔合	6	30
JMHS-221226	8	上表面裂纹	2	30
	9	内部裂纹	6	30
	10	下表面裂纹	4	30
JMHS-221227	11	根部未焊透	2	30
	12	根部未焊透	4	30
	13	根部未焊透	6	30
	14	根部坡口未熔合	2	30
	15	根部坡口未熔合	4	30

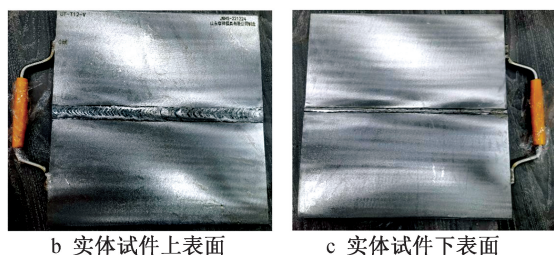
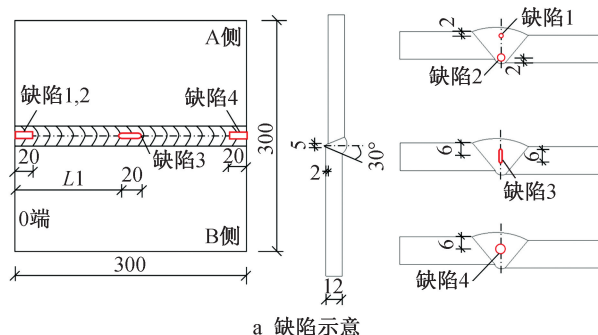


图1 试件JMHS-221224焊缝缺陷设置

Fig. 1 Setting of weld defects for specimen JMHS-221224

2 检测方法

本研究分别采用超声波法、相控阵超声波法和X射线法对预设缺陷错边焊缝试件进行检测,对比常用焊缝缺陷检测方法的检测效果。

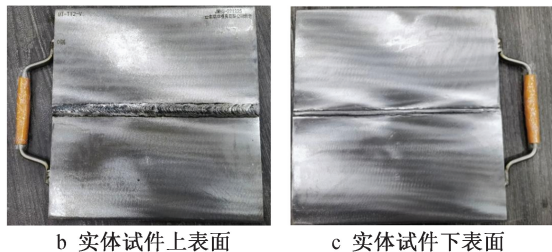
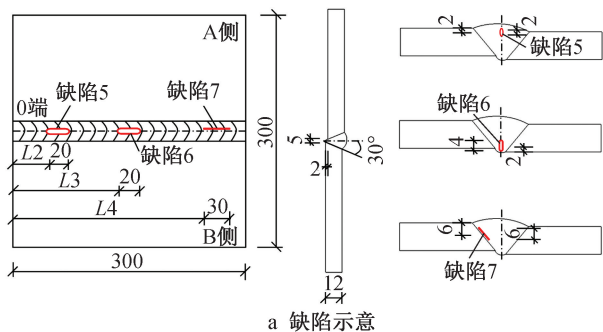


图 2 试件 JMHS-221225 焊缝缺陷设置

Fig. 2 Setting of weld defects for specimen JMHS-221225

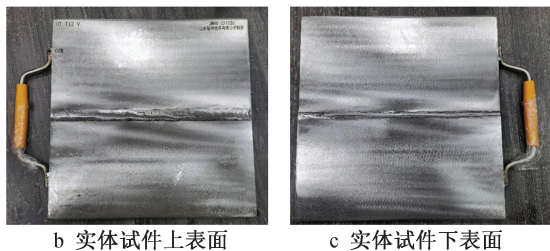
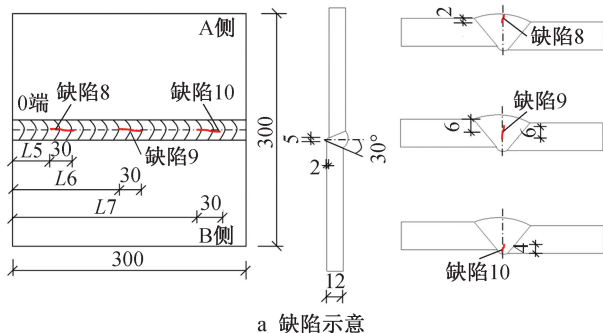


图 3 试件 JMHS-221226 焊缝缺陷设置

Fig. 3 Setting of weld defects for specimen JMHS-221226

2.1 超声波法

采用 Krautkramer USM88 型超声波探伤仪,根据 GB/T 11345—2023《焊缝无损检测 超声检测技术、检测等级和评定》的规定进行超声波焊缝缺陷检测,采用单面双侧检测,检测面为焊缝上表面,并在错边焊缝高边侧(A 侧)和低边侧(B 侧)分别进行检测。探头频率为 5MHz,楔块角度为 70°,在焊缝两侧至少各 10mm(且不小于实际热影响区宽度)的母材区域涂耦合剂后进行测量,在保持声束垂直焊缝进行前后左右移动的同时,探头还应进行 10°左右的转动,移动探头找到最大回波幅度,并记

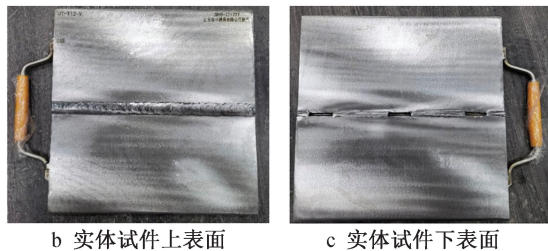
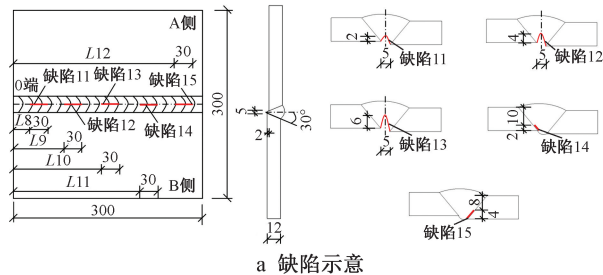


图 4 试件 JMHS-221227 焊缝缺陷设置

Fig. 4 Setting of weld defects for specimen JMHS-221227

录相对于参考等级的幅度差值,测定显示长度和显示高度,判定缺陷位置和大小。

2.2 相控阵超声波法

采用 Dphr Scan II 型相控阵超声检测仪进行焊缝缺陷检测,采用单面双侧检测,检测面为焊缝上表面,并在错边焊缝高边侧(A 侧)和低边侧(B 侧)分别进行检测。探头型号为 5L32-0.5-10-D2,频率为 5MHz,楔块型号为 SD2-N55S,角度为 55°,扇形扫查角度范围为 40°~75°,在焊缝两侧至少各 10mm(且不小于实际热影响区宽度)的母材区域涂耦合剂后进行沿线扫描测量,同时进行扇形扫描、A 扫描、B 扫描及 C 扫描,记录存储扫描数据,并做初步分析判定。调取扫描数据进行后期数据分析和整理,判断缺陷位置,测量缺陷深度、长度和大小等。

2.3 X 射线法

采用 YXLON SMART EVO 3005 型 X 射线机,根据 GB/T 3323.2—2019《焊缝无损检测 射线检测 第 2 部分:使用数字化探测器的 X 和伽玛射线技术》的规定进行 X 射线焊缝缺陷 RT 检测,焦点大小(表征 X 射线源的物理尺寸,影响图像几何不清晰度与缺陷分辨能力)为 1.0mm,电压范围为 50~300kV,电流范围为 0.5~4.5mA,最大 X 射线功率为 900W,辐射角为 30°×60°(分别对应 X 射线束在水平与垂直方向上的张角),最大辐射泄漏值为 5.0mSv/h,环境防护等级为 IP65,工作温度范围为 -20~50℃。X 射线机发射 X 射线,X 射线穿过测试试件在胶片上曝光成像,胶片暗室显影冲洗,判定缺陷位置和大小。

3 试验结果与分析

3.1 超声波法检测结果

各试件超声波法检测结果如表2所示。由表2可知,所有气孔缺陷均被检出,缺陷长度检测误差范围为10.0%~15.0%; $\phi 4, \phi 6$ 夹渣缺陷被检出,缺陷长度检测误差范围为-5.0%~15.0%, $\phi 2$ 夹渣缺陷尺寸小,所产生的缺陷波信号弱,未被检出,这说明超声波法无法有效识别小尺寸的夹渣缺陷;根部坡口未熔合缺陷均被检出,缺陷长度检测误差范围为0~16.7%,且该类型缺陷对检测面的要求较高;所有裂纹缺陷均被检出,缺陷长度检测误差为16.7%;根部未焊透缺陷均被检出,缺陷长度检测误差范围为16.7%~33.3%,较其他类型缺陷长度检测误差大。根据超声波法检测结果可知,检测面和反射波反射次数均可能影响焊缝缺陷检测,这是由于错边焊缝两侧存在高差,两侧检测得到的超声波波形不同,对焊缝缺陷检测结果具有较大影响。在实际工程应用中,应选取合适的超声反射波在2个焊缝检测面进行检测。

3.2 相控阵超声波法检测结果

各试件相控阵超声波法检测结果如表3所示。由表3可知,所有气孔、夹渣、根部坡口未熔合、裂纹、根部未焊透缺陷均被检出,其中根部坡口未熔合缺陷7的长度检测误差最大,达到了-52.0%,其余缺陷长度检测误差范围为-28.0%~9.0%。相较超声波法,相控阵超声波法可检出尺寸较小的 $\phi 2$ 夹渣缺陷,且对于焊缝根部未焊透缺陷具有更高的检测精度。同样地,相控阵超声波法在焊缝两侧检测得到的波形和图像也存在一定差异,在实际工程应用中,应在2个焊缝检测面均进行检测。

3.3 X射线法检测结果

X射线法检测错边焊缝缺陷时,由于只能单向X射线曝光成像,无法获得缺陷深度和高度。各试件X射线法检测结果如表4所示。由表4可知,气孔缺陷虽可被检出,但X射线成像图中气孔通常呈圆形或椭圆形的亮点,无法提取长度信息。夹渣、根部坡口未熔合、裂纹、根部未焊透缺陷均可被X射线法检出,缺陷长度检测误差范围为-10.0%~20.0%。

4 不同检测方法优缺点对比

不同检测方法优缺点对比如表5所示。相控阵超声波法对错边焊缝内部缺陷具有较好的检测效果,且能较好地实现缺陷面状和体状识别,能为构件承载力削弱影响程度定量分析提供一定依据。由于易受错边端角反射或余高反射等因素干扰,超声波法在错边焊缝缺陷检测上存在一定难度,且存在

表2 超声波法检测结果

Table 2 Ultrasonic testing results

缺陷编号	缺陷类型	检测面	缺陷长度/mm	缺陷深度/mm	波幅/dB	缺陷状态	缺陷长度检测误差/%
1	气孔	A	—	—	—	未检出	—
		B	22	0.7	19.3	二次波	10.0
2	气孔	A	22	11.0	15.4	—	10.0
		B	22	8.5	17.5	—	10.0
3	条状夹渣	A	23	7.3	18.0	—	15.0
		B	23	6.3	18.2	—	15.0
4	气孔	A	23	5.4	22.9	—	15.0
		B	23	6.0	20.3	二次波	15.0
5	条状夹渣	A	—	—	—	未检出	—
		B	—	—	—	未检出	—
6	条状夹渣	A	19	11.1	10.4	—	-5.0
		B	19	11.0	12.2	—	-5.0
7	根部坡口未熔合	A	30	9.8	15.1	—	0
		B	—	—	—	未检出	—
8	上表面裂纹	A	35	2.0	15.7	二次波	16.7
		B	35	1.1	11.9	二次波	16.7
9	内部裂纹	A	35	11.4	12.9	二次波	16.7
		B	35	10.8	9.6	—	16.7
10	下表面裂纹	A	35	6.8	7.8	二次波	16.7
		B	35	5.6	9.4	二次波	16.7
11	根部未焊透	A	40	11.6	18.2	—	33.3
		B	40	11.2	21.3	二次波	33.3
12	根部未焊透	A	35	11.7	25.0	—	16.7
		B	35	11.7	25.2	—	16.7
13	根部未焊透	A	36	11.4	21.9	—	20.0
		B	36	11.8	22.2	—	20.0
14	根部坡口未熔合	A	35	10.7	13.8	—	16.7
		B	—	—	—	未检出	—
15	根部坡口未熔合	A	35	13.0	16.3	—	16.7
		B	35	11.0	22.6	二次波	16.7

表3 相控阵超声波法检测结果

Table 3 Phased array ultrasonic testing results

缺陷编号	缺陷类型	缺陷深度/mm	缺陷长度/mm	缺陷高度/mm	缺陷检测效果	缺陷长度检测误差/%
1	气孔	2.5	15.5	2.5	—	-22.5
2	气孔	9.0	21.8	3.0	—	9.0
3	条状夹渣	3.3	21.5	2.5	当量低	7.5
4	气孔	5.0	17.6	2.9	—	-12.0
5	条状夹渣	2.0	15.2	2.0	—	-24.0
6	条状夹渣	9.9	14.4	2.1	—	-28.0
7	根部坡口未熔合	1.4	14.4	6.1	—	-52.0
8	上表面裂纹	0	25.8	2.7	—	-14.0
9	内部裂纹	7.0	31.6	5.0	当量低	5.3
10	下表面裂纹	2.0	31.6	6.0	当量低	5.3
11	根部未焊透	10.0	23.7	2.0	—	-21.0
12	根部未焊透	7.3	27.9	4.7	—	-7.0
13	根部未焊透	7.1	30.0	4.9	—	0
14	根部坡口未熔合	9.5	28.8	2.5	—	-4.0
15	根部坡口未熔合	8.4	25.9	3.6	—	-13.7

表4 X射线法检测结果
Table 4 X-ray testing results

缺陷编号	缺陷类型	缺陷长度/ mm	缺陷距0端 的距离/ mm	缺陷长度 检测误差/ %
1	气孔	—	—	—
2	气孔	—	—	—
3	条状夹渣	24	112	20.0
4	气孔	—	—	—
5	条状夹渣	18	57	-10.0
6	条状夹渣	21	136	5.0
7	根部坡口未熔合	28	203	-6.7
8	上表面裂纹	30	53	0
9	内部裂纹	33	215	10.0
10	下表面裂纹	28	134	-6.7
11	根部未焊透	35	16	16.7
12	根部未焊透	32	131	6.7
13	根部未焊透	33	246	10.0
14	根部坡口未熔合	34	75	13.3
15	根部坡口未熔合	31	186	3.3

误判可能。X射线法成像结果直观,且能较好地检出错边焊缝缺陷,但无法检测缺陷深度及高度,且存在辐射污染问题。

表5 不同检测方法优缺点对比

Table 5 Comparison of advantages and disadvantages of different testing methods

检测方法	优点	缺点
超声波法	检测设备便宜,检测方法传统,操作相对简单	缺陷检出率较低,易受干扰,需现场判断,无法后期处理分析
相控阵超声波法	缺陷检出率较高,能多点、多角度扫描形成多维图像,可存储数据便于后期分析,操作较便利	仪器设备较贵,操作面相对较大,缺陷宽度无法准确检出
X射线法	检测结果直观,缺陷检出率高,缺陷平面位置及长度显示准确	辐射污染大,无法确定缺陷深度及高度

5 结语

1)利用超声波法检测错边焊缝缺陷时,检测回波信号存在一次波和二次波,多数缺陷可被检出,但存在部分缺陷检出困难或检出信号不显著等问题,个别缺陷未被检出,存在较大漏检风险。

2)利用相控阵超声波法检测错边焊缝缺陷时,缺陷检出率较高,且能实现多维显示,可较准确测得缺陷位置、长度和高度,但较难测得缺陷宽度。

3)利用X射线法检测错边焊缝缺陷时,不同类型缺陷均有较清晰的显影显示,缺陷平面位置和尺寸均可较好地检出,但由于只能进行单向X射线曝光成像,无法获得缺陷深度及高度。

4)对比3种缺陷检测方法可知,相控阵超声波法对错边焊缝内部缺陷具有较好的检测效果,且能较好地实现缺陷面状和体状识别,能为构件承载力削弱影响程度定量分析提供一定依据。

参考文献:

- [1] 周文果,熊邦书,莫燕,等. 钢轨焊缝错边的视觉检测方法[J]. 半导体光电,2018,39(2):264-267.
ZHOU W G, XIONG B S, MO Y, et al. Visual inspection method for misalignment of rail welding [J]. Semiconductor optoelectronics, 2018, 39(2):264-267.
- [2] 杨晓东,杨俊芬,李倩,等. 建筑钢结构焊缝超声波探伤失误案例分析[J]. 施工技术(中英文),2023,52(14):40-45,98.
YANG X D, YANG J F, LI Q, et al. Fault case analysis of ultrasonic flaw detection for building steel structure welding seam [J]. Construction technology, 2023, 52(14):40-45, 98.
- [3] 赵越,王铨,关晓迪,等. 钢箱梁拼装施工环缝焊接过程及影响分析[J]. 施工技术(中英文),2025,54(8):40-46.
ZHAO Y, WANG C, GUAN X D, et al. Welding process and impact analysis of circumferential seams in steel box girder construction [J]. Construction technology, 2025, 54(8):40-46.
- [4] 姜永. 建筑钢结构焊缝无损检测技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(3):137-140,161.
JIANG Y. Non-destructive testing technology for welding seams in building steel structures [J]. Construction technology, 2024, 53(3):137-140, 161.
- [5] 王亚婷,张国权. 钢结构工程焊缝无损检测技术研究[J]. 工程技术研究,2021,6(17):69-70.
WANG Y T, ZHANG G Q. Research on nondestructive testing technology of weld seam in steel structure engineering [J]. Engineering and technological research, 2021, 6(17):69-70.
- [6] 顾晓雯. 用于钢结构检测的无损探伤技术研究[J]. 工程技术研究,2023,8(14):216-218.
GU X W. Research on non-destructive testing technology for steel structure inspection [J]. Engineering and technological research, 2023, 8(14):216-218.
- [7] LI W T, ZHANG W B, YANG G P, et al. Application research on ultrasonic phased array detection algorithm for austenitic stainless steel with V-groove weld [J]. Measurement, 2024, 226:114169.
- [8] 方荣超,谢春雷,赵小辉,等. 基于超声相控阵的挖掘机动臂焊缝内部检测关键技术探究[J]. 科学技术创新,2023(7):184-187.
FANG R C, XIE C L, ZHAO X H, et al. Research on the key technology of internal detection of excavator arm weld based on ultrasonic phased array [J]. Scientific and technological innovation, 2023(7):184-187.
- [9] 徐万宝,杨昊,张炜豪,等. 相控阵超声检测技术在钢结构建筑工程检测中的应用研究[J]. 安徽建筑,2022,29(9):164-166.
XU W B, YANG H, ZHANG W H, et al. Research on the application of phased array ultrasonic testing technology in steel structure construction engineering inspection [J]. Anhui architecture, 2022, 29(9):164-166.

- 2021,47(1):79-80,84.
- SUN G L, ZHAO B X. Discussion on application prospect of implantable composite pile[J]. Sichuan building materials, 2021, 47(1):79-80,84.
- [9] 贾宝荣,邵治理,朱其凯,等.上海深厚砂层旋挖桩施工技术关键技术研究[J].施工技术(中英文),2024,53(19):25-29.
- JIA B R, SHAO Z L, ZHU Q K, et al. Research on key construction technology of rotary excavation pile in deep sand layer in Shanghai[J]. Construction technology, 2024, 53(19):25-29.
- [10] 邵治理.上海深厚砂层旋挖桩成孔实测及数值分析[J].施工技术(中英文),2024,53(19):30-34.
- SHAO Z L. Measurement and numerical analysis of drilling holes for rotary excavation pile in deep sand layer in Shanghai[J]. Construction technology, 2024, 53(19):30-34.
- [11] 刘俊龙.砾卵石层中预制桩的承载性状研究[J].岩土力学,2008,29(5):1280-1284,1298.
- LIU J L. Research on bearing capacity behavior of precast concrete piles in gravel stratum[J]. Rock and soil mechanics, 2008, 29(5):1280-1284,1298.
- [12] 戴立.植入法预应力高强混凝土管桩沉桩施工的质量控制要点[J].工程质量,2021,39(S1):74-77.
- DAI L. Key points of quality control in pile sinking construction of prestressed high-strength concrete pipe pile by implantation method[J]. Construction quality, 2021, 39(S1):74-77.
- [13] 陈怀智,潘湘文,阮白一,等.旋挖植桩法在铁路桥梁桩基的创新应用[J].铁道建筑技术,2021(12):15-18,60.
- CHEN H Z, PAN X W, RUAN B Y, et al. Innovative application of rotary digging pile planting method in railway bridge pile foundation[J]. Railway construction technology, 2021(12):15-18,60.
- [14] 朱峰,刘峥志,雷斌.深厚易塌孔地层灌注桩旋挖全套管钻沉拔一体施工技术[J].施工技术(中英文),2024,53(7):130-135.
- ZHU F, LIU Z Z, LEI B. Integrated construction technology of pipe drilling, sinking and pulling of bored pile in deep and easy-to-collapse stratum[J]. Construction technology, 2024, 53(7):130-135.
- [15] 董金荣.桩底沉渣对桩侧摩阻力影响及桩承载力的估算[J].工业建筑,2009,39(4):93-97.
- DONG J R. Influence of pile bottom slime on skin friction and bearing capacity estimation to pile[J]. Industrial construction, 2009, 39(4):93-97.
- [16] 李典庆,鄢丽丽.考虑桩底沉渣的灌注桩可靠度分析方法[J].岩土力学,2008,29(1):155-160.
- LI D Q, YAN L L. Reliability evaluation of bored pile considering possibility of toe debris presence[J]. Rock and soil mechanics, 2008, 29(1):155-160.
- [17] 张传海,王长锁,黄宁,等.复杂地质条件下旋挖钻孔灌注桩三段式成孔技术[J].施工技术(中英文),2022,51(17):117-120.
- ZHANG C H, WANG C S, HUANG N, et al. Three-stage hole formation construction technology of rotary drilling bored pile under complicated geological conditions[J]. Construction technology, 2022, 51(17):117-120.
- [18] 周李,赵学敏.静动法桩基承载力检测技术及应用[J].公路,2024,69(12):397-400.
- ZHOU L, ZHAO X M. Static and dynamic method of pile foundation bearing capacity detection technology and application[J]. Highway, 2024, 69(12):397-400.
- [19] 王年旭.建筑桩基预应力管桩承载力分析[J].工程机械与维修,2024(12):109-111.
- WANG N X. Analysis of bearing capacity of prestressed pipe pile in building pile foundation[J]. Construction machinery & maintenance, 2024(12):109-111.

(上接第41页)

- [10] 张进,徐进,裴彦鹤.铁素体钢薄板对接焊缝相控阵超声检测标准分析[J].电焊机,2023,53(6):122-128.
- ZHANG J, XU J, PEI Y H. Analysis of phased array ultrasonic testing standard for ferrite steel thin-plate butt welds of nuclear power plant[J]. Electric welding machine, 2023, 53(6):122-128.
- [11] 宋泽宇,胡静,莫润阳.多模式全聚焦法对焊缝内部条状缺陷的检测及定量[J].无损检测,2023,45(7):53-60.
- SONG Z Y, HU J, MO R Y. Detection and quantification of weld internal defects by multi-mode total focus method[J]. Nondestructive testing, 2023, 45(7):53-60.
- [12] 黄圣超.焊缝尺寸视觉测量与表面缺陷检测方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2023.
- HUANG S C. Research on weld dimension visual measurement and surface defect detection method[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2023.
- [13] 魏明贤.基于线结构光的激光焊缝视觉检测系统研究[D].南昌:南昌航空大学,2022.
- WEI M X. Research on laser weld visual inspection system based on line structured light[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2022.
- [14] 马中军,王晓威,王智楠.综合BIM结合表面图像分析的钢结构无损检测方法[J].地震工程学报,2019,41(4):1079-1085.
- MA Z J, WANG X W, WANG Z N. Nondestructive testing method for steel structures based on building information modeling and surface image analysis[J]. China earthquake engineering journal, 2019, 41(4):1079-1085.
- [15] DHRUVA K D, FANG C, ZHENG Y, et al. Semi-supervised transfer learning-based automatic weld defect detection and visual inspection[J]. Engineering structures, 2023, 292:116580.
- [16] 闫留青.单面焊对接环焊缝中由错边引起的根部超声回波特征[J].无损检测,2021,43(4):66-67,70.
- YAN L Q. Ultrasonic root echo characteristics for single side welding butt offset weld[J]. Nondestructive testing, 2021, 43(4):66-67,70.