

轻量化材料焊接车间智能化要素分析

周安亮, 王德成

(机械科学研究总院, 北京 100044)

摘要: 本文从轻量化材料焊接最终目标和需求、数字化和智能化技术发展趋势、焊接车间柔性构建三个维度出发, 结合先进制造车间智能化和焊接工艺数字化技术发展趋势, 分析得出了轻量化材料焊接车间智能化需满足的焊接控制管理实时化、焊接过程质量控制闭环化、焊接性分析数据化、焊接工艺分析智能化、快速互换装夹(柔性化)、焊缝质量检测工具化、焊接生产管理数字化、焊接基础数据库无纸化八大基本要素, 并对这些要素分别进行了阐述, 相关结论可以作为焊接车间智能化改造或新建的参考。

关键词: 焊接工艺; 焊接车间; 智能化; 轻量化材料; 战略研究

中图分类号: TG42 **文献标识码:** A

Factor Analysis of Lightweight Material Welding Workshop Intelligentization

Zhou Anliang, Wang Decheng

(China Academy of Machinery Science & Technology, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper conducts strategic research on the following three dimensions: final purpose and demand of lightweight material welding; development trends of digitized and intelligentized technology; and flexible construction of the welding workshop. By combining these dimensions with the technology development trends of advanced workshop intelligentization and welding process digitization, eight basic factors that lightweight welding workshop intelligentization should satisfy are obtained, including welding control management real-time transformation, quality control while welding closed loop transformation, welding analysis datamation, welding technology analysis intelligentization, rapid interchangeable clamping (flexibility), welding line quality inspection instrumentalization, welding production management digitization, and welding foundation database paperless transformation. Furthermore, this paper systematically explains these factors, and provides a related conclusion that could be used in reference to the improvement or new establishment of welding workshop intelligentization.

Keywords: welding technology; welding workshop; intelligentization; lightweight material; strategic research

轻量化材料在汽车、航空、航天、高速列车等领域有广泛的应用, 如铝合金在波音 777 飞机上的应用比例达到 70%, 在空客 A380 上的应用比例达到 61%^[1], 高速动车大量采用蜂窝或泡沫结构

铝合金蒙皮, 采用轻质化和更高性能替代材料及新成型工艺已成为工业产品发展的主流。汽车的重量每减轻 10%, 油耗可降低 6%~8%, 排放随之降低 4%^[2]。常见的轻量化材料有高强度钢材、铝合

收稿日期: 2017-07-17; 修回日期: 2017-09-29

通讯作者: 周安亮, 机械科学研究总院, 工程师, 主要研究方向为智能制造和基础工艺; E-mail: 15888812999@qq.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“基础制造工艺与智能化技术融合发展战略研究”(2015-ZCQ-01)

本刊网址: www.enginsci.cn

金、镁合金、碳纤维材料、工程塑料等，轻量化金属及金属合金材料仍占主导地位，轻量化材料应用已经成为制造业关注的焦点 [3]。轻量化材料焊接加工是轻量化材料结构件加工的最主要加工工艺之一，如汽车车身、飞机的壁板、高铁的夹层板等 [4]。区别于传统的钢材连接焊接，轻量化材料焊接加工的质量直接影响到相关产品的质量、性能和制造周期，对焊接工艺的质量控制要求更高 [5]。轻量化材料焊接工艺的发展迫切需要改变当前焊接产品质量依赖于操作工技能的现状，应用数字化和智能化技术手段与轻量化材料焊接知识库，实现焊接工艺参数优化以及焊接缺陷识别，消除焊接裂纹、变形等不可控因素，提升焊接精度，转变焊接生产模式，支撑轻量化材料焊接产品的高质量、高效率制造。

一、传统轻量化材料焊接车间现状及问题

长期以来，我国的轻量化材料焊接工艺虽能满足现役产品的基本生产需求，但生产能力和技术水平相对落后，质量稳定性不高，手工作业占比较大，导致产生诸多问题 [6]。近些年来，在一些制造流程中部分应用了自动化焊接设备，实现了轻量化材料焊接工艺的机械化、半自动化，效率也明显得到了提升 [7~11]。但在夹装、测量等辅助环节，自动化焊接参数选择与过程控制等大多采用基于手工和经验的传统方式，依旧存在产品质量稳定性不足、效率偏低的困境。以国内某轻量化材料零部件企业的生产焊接工艺为例，其当前焊接车间的主要制造技术手段如图 1 所示。图 1 所示的焊接工艺流程以及生产现状只能满足质量要求不高的轻量化材料焊接需求，或成品率和产量要求不高的市场需求。

从图 1 可知，传统轻量化材料焊接车间主要存

在三大问题：①产品质量控制未形成闭环，很大程度上仍主要依赖技术工人的技能，产品质量稳定性不高；②受参数优化水平和检测手段、调度方式、装夹方式、缺陷判定方式落后等因素的影响，生产效率较低；③工艺设计和产品可制造性分析仍然依赖于个人的知识与经验，新产品工艺往往需要不断“试错”以获得可行的工艺方案，产品焊接制造柔性不足，生产线快速复制能力弱。传统轻量化材料焊接车间向智能焊接车间转型的要素主要集中在提升产品一致性、增加制造柔性、提高制造效率三个维度。

二、轻量化材料焊接车间智能化要素分析

在工业发达国家，汽车、飞机等领域的制造企业广泛应用了自动化技术、传感器技术、智能技术、信息技术、机器人技术等，逐步实现了制造车间的数字化和智能化 [12,13]。其中较为典型的要素有：①以产品及车间数字化建模与仿真实现产品或装备的快速开发，其中部分产品或零件实现了一次开发成功，缩短了产品的研制周期，实现了快速响应制造；②以制造现场的数字化和网络化实现对生产设备运行参数和生产系统故障的过程监控、检测、显示，甚至实现企业生产过程的智能化分析、调度和控制；③以制造装备单元的精密化和智能化实现车间的智能化，如波音公司的数字化车间大量应用了自动化辅助装备和数字化制造技术，实现制造时间减少 66%、装配工装减少 90% 的成效 [14]。对比国外较为典型的智能车间的要素和国内传统轻量化材料焊接车间的主要问题，形成图 2 所示的要素图谱。

由图 2 可知，为实现轻量化材料焊接产品一致

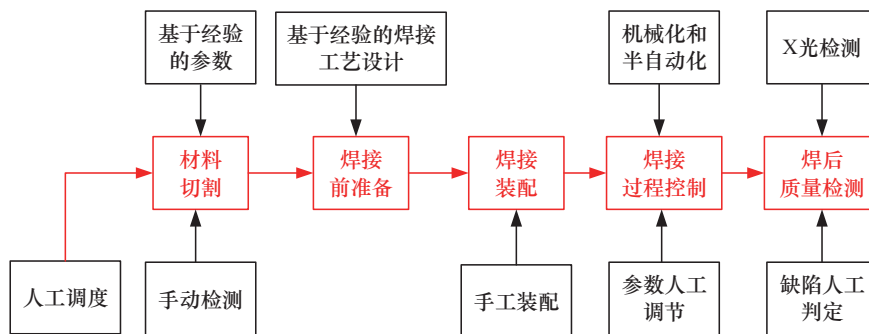


图 1 我国当前焊接车间的制造技术手段

性、制造柔性、制造效率的提升,焊接车间智能化应采取仿真建模、数字化和网络化、智能化制造单元等先进且成熟的技术手段,解决对技术人员技能的依赖、现场制造信息未闭环、检测手段落后、调度方式落后、在线分析手段缺失等问题,轻量化材料焊接车间智能化需满足技术发展维度、目标需求维度、车间构建维度三要素。

结合国外智能焊接技术和工艺发展情况,选取某汽车焊接智能车间项目(见图3)对轻量化材料焊接车间智能化要素进行分析。该智能焊接车间完成了对焊接设备的驱动和控制系统的配置,对焊接方法、工艺参数及范围进行定义;建立了有关数据库,存储并汇编现有各种焊接生产过程的数据,通过安装于焊接设备的智能终端与操作者交互通信,逐步充实数据库,供各焊接工作站共享;按照预置的焊件母材种类规格、焊接方法、焊接材料种类和规格等原始数据,编制优化焊接工艺参数的程序;按照工件形状、尺寸和接缝预设的偏差界限,编制自动修正和补偿程序;按照焊接工艺参数实时的检测参数与标准预置参数之间的偏差,编制自动控制焊缝质量的程序、工艺参数失控的警报程序和参数显示及记录程序;按照焊接过程实时摄制的焊接区图像以及焊接电弧和焊道形状参数编制远程监控的

程序;对焊接设备的驱动系统和控制系统、送丝机及焊接电源编制故障自动诊断报警和修复程序;焊接设备的控制系统与分布式控制系统(DCS)操作站之间建立数据通信联络,完成数控程序的管理、分配,生产数据的收集,加工过程的监控和远程诊断功能[15]。

从车间构建和目标需求维度,智能焊接车间由DCS统一控制和调配,系统根据管理层下达的生产任务,预置各制造单元动作程序和拟检测数据,确定整个制造流程,最终启动工作程序实现焊接指令,并将加工过程中的参数实时采集到主控制单元,进行在线检测、质量控制、焊接工艺过程监控、分析和工序优化调整。从实现焊接调度和控制管理角度,焊接生产管理数字化、控制管理实时化是焊接车间智能化构建的基本要素;从焊接设备快速调整和柔性切换以及焊接质量保证角度,快速互换装夹(柔性化),焊缝质量检测工具化是焊接车间智能化构建的基本要素。

从焊接工艺技术发展维度,数字化和智能化焊接技术带来了焊接车间设备的集成和简化,产品质量的精确、可靠。围绕着焊接质量、焊接效率、焊接飞溅等持续改进焊接控制技术,国外厂商Fronius、ESAB、Lincoln率先实现了全数字化

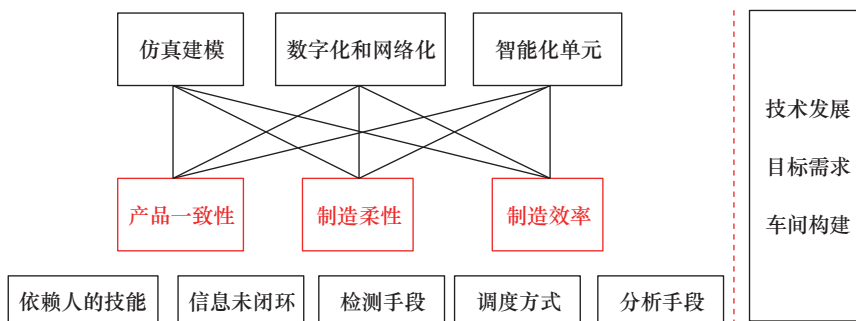


图2 轻量化材料焊接车间智能化要素图谱



图3 汽车车身智能焊接车间

在焊接设备的应用，微处理器的精确运算控制焊接的各项性能以及工作过程，即数字化和智能化焊接变得集成、简化。与传统依赖焊接工人的焊接工艺相比，数字化和智能化焊接可同时实现熔化极惰性气体保护焊接（MIG）/熔化极活性气体保护电弧焊接（MAG）/机器人焊接/非熔化极惰性气体钨极保护焊接（TIG）、手工电弧焊等多种功能在一台机器上实现，在极短时间内响应电弧长度的变化，控制变得前所未有的精确、可靠。焊接设备的软件升级可应用于不同场合的需要，保证焊接质量的一致性和焊缝成型的美观。伴随着微处理器的精确运算，内部集成了大量的专家系统，可实现各种焊接规范，实现精确的起弧收弧。比如 OTC（欧地希）WB-M350L 焊接机型，专注于数字电源控制下焊接工艺的改善，实现焊接同 MAG 一样低飞溅，比同类焊机减少 80% 的飞溅物，提高了工件的表面质量。又如 Fronius 公司的 Transplus synergic 2700/4000/5000 系列产品在一台焊机上实现了 MIG/MAG、TIG 和手工电弧焊等多种焊接方法，可存储近 80 个焊接程序，还可以通过网络进行工艺管理和控制软件升级 [16]。从技术发展目标需求维度，焊接过程质量控制闭环化、焊接基础数据库无纸化、焊接性分析数据化、焊接工艺分析智能化是焊接车间智能化的基本要素。

三、轻量化材料焊接车间智能化基本要素

从上述要素分析可知，轻量化材料焊接车间智能化需从数字化和智能化技术发展维度、焊接最终目标和需求维度、焊接车间柔性构建维度，满足焊接控制管理实时化、焊接过程质量控制闭环化、焊接性分析数据化、焊接工艺分析智能化、快速互换装夹（柔性化）、焊缝质量检测工具化、焊接生产管理数字化、焊接基础数据库无纸化八大基本要素，分别对应实现如下八大基本要素系统。

1. 轻量化材料焊接控制管理系统

轻量化材料焊接控制管理系统是以车间设备信息采集、工业现场信息、车间网络的数据统计为对象建立的焊接生产过程管理系统，实现焊接运行的状况、实时数据、历史数据、警告的记录存储，基于焊接设备的故障分类、基于焊接产品质量下降对系统故障原因等进行智能分析、故障预警和诊断，

处理出初步结果供运行和管理人员参考。轻量化材料焊接控制管理系统是焊接车间数据收集和管控的主要平台。

2. 轻量化材料焊接过程质量控制系统

轻量化材料焊接过程质量控制系统是以高精度在线测量为基础，并基于在线检测数据替代人工检测和调整补偿，动态调整装配装夹系统、调整装配流程、优化装配工艺等，实现焊接过程工艺参数的动态闭环控制。常见的有采用激光传感器跟踪焊接过程，采用焊接路径自适应技术、视觉传感的焊缝成形控制技术、弧长自适应控制技术、恒压力自适应控制技术等，实现轻量化材料焊缝轨迹、焊缝间隙、传输控制协议（TCP）位姿等焊接工艺参数的记录，反馈至上位机自适应调整机器人焊接路径、焊接工艺参数，达到焊接的自适应闭环控制，辅以质量分析系统、故障分析系统的智能化分析实现焊接质量可追溯。此外，还有基于视觉的焊缝自适应控制系统，通过选择合适的减光、滤光系统，获取熔池图像；基于轻量化材料特定焊接工艺和焊接工件材料开发的鲁棒性图像处理算法，提取焊缝熔池视觉特征，给出与焊接过程稳定和质量控制相关的特征信息；并基于焊缝熔池动态几何尺寸、焊缝前段间隙和焊接熔透等信息，运用模糊辨识、粗糙集理论对焊接过程进行知识建模，并设计控制焊缝成形及质量的智能控制策略。焊接过程质量控制系统是实现轻量化材料焊接信息闭环、焊接质量一致性以及焊接智能化的基本前提。

3. 轻量化材料焊接性分析专家系统

焊接性分析专家系统是以轻量化材料试验数据库、焊接方法选择、焊接裂纹敏感性分析数字化结果等为对象建立的数据库。其中，轻量化材料试验数据库将对常用铝合金、薄壁钢等轻量化材料焊接性试验数据进行整理和归类，并对数据以数据库的形式进行数字化存储和管理，技术人员可直接通过该数据库查询相关轻量化材料焊接性试验数据；焊接方法选择是以提供的基本需求信息为输入，辅助综合分析为手段，从质量、效率及成本等因素间对焊接方法进行遴选，寻求最佳结果。焊接裂纹敏感性分析是以焊接工艺与焊接过程敏感性为关联，应用模糊推理等手段综合分析，并给出裂纹大小和位置的产生状况预测。焊接性分析专家系统是提升制造效率、保障产品一致性的重要依据。

4. 轻量化材料焊接工艺分析专家系统

焊接工艺分析专家系统是以轻量化材料焊接工艺知识和焊接工艺推理机为对象建立的数据库。该系统一方面能够实现轻量化材料焊接工艺自动化和智能化设计,涉及轻量化材料的常用焊接方法、材料的各种牌号、焊接材料选择、焊接接头设计、焊接工艺规范参数推荐 [17];另一方面能够系统通过获取焊接方法、材料牌号、焊接材料、焊接接头等工艺知识,与现有推荐工艺进行比较,丰富焊接工艺知识库,完善焊接工艺推理机制 [18]。工艺分析专家系统是实现在焊接自动化和智能化、提高焊接效率的前提。

5. 轻量化材料焊接快速互换装夹系统

轻量化材料焊接快速互换装夹系统是借鉴机器人和辅助自动化设备比较成熟的汽车行业的柔性装夹方式,克服传统焊接装夹只能应对单一品种、焊接工装数量庞大、存储管理复杂、换工装耗时长等难题,采用统一的设计规范和标准,设计组合式、模块化的柔性焊接工装,提高互换性,实现一装多用,实现机械快速定位和电气快速切换。快速互换装夹系统是实现在焊接自动化、提升焊接效率、增强焊接制造柔性的重要因素。

6. 轻量化材料焊缝质量检测系统

轻量化材料焊缝质量检测系统是区别于目前采用胶片成像、缺陷大小及类别人工判断的现状,采用 X 射线 [19]、集成超声相控阵等数字化实时成像系统 [20],亦或采用激光传感系统实现对焊接缺陷的高精度自动检测和判断,以实现对焊接过程质量的追溯 [21]。焊缝质量检测作为焊缝质量的有效控制手段穿插于焊接的各个环节,也是下一道焊接工序的通行证。轻量化材料焊缝质量检测工具的先进性、检测的实时性和检测效率对全焊接制造周期起着至关重要的作用。

7. 轻量化材料焊接生产管理系统

轻量化材料焊接生产管理是以电子看板技术、传感技术、仿真技术等为基础,通过产品数据管理 (PDM) 提供的工程数据库及其应用接口,对企业资源计划 (ERP)、制造企业生产过程执行系统 (MES)、计算机辅助工艺过程设计 (CAPP) 和计算机辅助制造 (CAM) 等系统进行集成,实现同设备互相联系和交互,为焊接智能车间业务信息的获取与处理的速度和准确性提供支撑,实现快速响应

制造能力和精细化管理。轻量化材料焊接生产管理系统是焊接车间信息、设备、人员调度和管控的核心平台。

8. 轻量化材料焊接基础数据库

焊接基础数据库是以焊接母材、焊接材料、焊接工艺、焊接标准、焊接缺陷等为对象建立的数据库。其中,焊接母材数据库主要存储焊接母材的化学成分、热物理性能及力学性能,工艺人员无需翻阅纸质版标准和手册,可直接查询焊接母材的相关数据。焊接材料数据库主要存储焊接材料及焊接材料生产信息的相关数据指标,工艺人员可大幅度降低焊接材料选择难度,直接查询相关焊接材料的数据信息及生产厂家的联系方式。焊接工艺数据库既包含类似的焊接工艺,又包含焊接工艺设计基础知识,工艺人员可查询此数据库,直接调用成熟工艺数据或使用工艺数据作为参考。焊接标准数据库可方便工艺人员查询相关标准制。焊接缺陷数据库存储焊接生产中的各类焊接缺陷,便于用户快速查询分析。基础数据库是实现产品一致性的重要保障。

四、结语

本文描述了传统焊接车间制造技术手段和存在的问题,并结合国外汽车、飞机先进的制造车间要素,以焊接最终目标 and 需求、数字化和智能化技术发展趋势、焊接车间柔性构建三个维度作为焊接车间智能化要素的基本维度,总结汽车领域某先进智能焊接车间项目的智能化功能,并结合焊接工艺数字化和智能化技术发展趋势,分析得出焊接车间智能化的八大基本要素,并描述了焊接车间智能化对应的八大基本要素系统,为焊接行业及企业进行车间数字化和智能化改造或建设提供参考。

参考文献

- [1] 张宝柱, 孙洁琼. 钛合金在典型民用飞机机体结构上的应用现状 [J]. 航空工程进展, 2014, 5(3): 275-280.
Zhang B Z, Sun J Q. Recent applications of Titanium alloys in typical commercial aircraft fuselage structure [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(3): 275-280.
- [2] 孙翔. 基于PID技术铝合金MIG焊工艺设计[D]. 长沙: 湖南大学(硕士学位论文), 2013.
Sun X. The process control of aluminum alloy MIG welding based on PID technology (Master's thesis) [D]. Changsha: Hunan University, 2013.

- [3] 张磊. 汽车轻量化材料及制造工艺研究现状 [J]. 科技展望, 2017 (3): 38.
Zhang L. Research status of lightweight automotive materials and its manufacturing technologies [J]. Science and Technology, 2017 (3): 38.
- [4] 肖祺, 何毅政. 泡沫铝材料在轨道列车上的应用 [J]. 科技展望, 2014 (3): 19–20.
Xiao Q, He Y Z. The application of aluminum foams in rail train [J]. Science and Technology, 2014 (3): 19–20.
- [5] Seffer O, Pfeifer R, Springer A, et al. Investigations on laser beam welding of different dissimilar joints of steel and aluminum alloys for automotive lightweight construction [J]. Physics Procedia, 2016 (83): 383–395.
- [6] 段孟琪. 中国制造业的发展瓶颈与改进问题探究 [J]. 商场现代化, 2010 (30): 75–76.
Duan M Q. Research on the development bottleneck and improvement of Chinese manufacturing industry [J]. Market Modernization, 2010 (30): 75–76.
- [7] 林尚扬, 关桥. 我国制造业焊接生产现状与发展战略研究 [J]. 机械工人: 热加工, 2004 (8): 16–20.
Lin S Y, Guan Q. Study on the production situation and development strategies of Chinese welding manufacturing [J]. Machinist Metal Forming, 2004 (8): 16–20.
- [8] 张光先, 陈冬岩, 李朋. 焊接设备的数字化、网络化及群控系统 [J]. 电焊机, 2013, 43(5): 10–16.
Zhang G X, Chen D Y, Li P. Digitalization, networking, and group control system of welding equipment [J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(5): 10–16.
- [9] 孙西领. 长春博泽公司焊接生产线改进研究 [D]. 长春: 吉林大学(硕士学位论文), 2014.
Sun X L. The improvement study for welding production line of brose changchun company (Master's thesis) [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [10] 周济. 制造业数字化智能化 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(20): 2395–2400.
Zhou J. Digitization and intellectualization for manufacturing industries [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(20): 2395–2400.
- [11] 张国军, 黄刚. 数字化工厂技术的应用现状与趋势 [J]. 航空制造技术, 2013 (8): 34–37.
Zhang G J, Huang G. Digital factory: Its application situation and trend [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013 (8): 34–37.
- [12] 李晓延, 武传松, 李午申. 中国焊接制造领域学科发展研究 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 19–31.
Li X Y, Wu C S, Li W S. Study on the progress of welding science and technology in China [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 19–31.
- [13] Lee D, Ku N, Kim T, et al. Development and application of an intelligent welding robot system for shipbuilding [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(2): 377–388.
- [14] 刘检华, 孙连胜, 张旭, 等. 三维数字化设计制造技术内涵及关键问题 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(3): 494–504.
Liu J H, Sun L S, Zhang X, et al. Connotation and key problem of three-dimensional digital design and manufacturing technology [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 494–504.
- [15] 刘金龙, 李江. 信息化焊接管理系统iWeld4.0 [J]. 金属加工(热加工), 2015 (12): 38–41.
Liu J L, Li J. The iWeld4.0: Informational welding management system [J]. MW Metal Forming, 2015 (12): 38–41.
- [16] 王振民, 冯允樑, 冯锐杰. 可视化人机交互系统的研制 [J]. 焊接技术, 2015, 44(2): 46–50.
Wang Z M, Feng Y L, Feng R J. The development of visualization human-computer interaction system [J]. Welding Technology, 2015, 44(2): 46–50.
- [17] 熊华平, 毛建英, 陈冰清, 等. 航空航天轻质高温结构材料的焊接技术研究进展 [J]. 材料工程, 2013 (10): 1–12.
Xiong H P, Mao J Y, Chen B Q, et al. Research advances on the welding and joining technologies of light-mass high-temperature structural materials in aerospace field [J]. Journal of Materials Engineering, 2013 (10): 1–12.
- [18] 关桥. 焊接/连接与增材制造(3D打印) [J]. 焊接, 2014 (5): 1–8.
Guan Q. Welding/connection and additive manufacturing (3D printing) [J]. Welding & Joining, 2014 (5): 1–8.
- [19] 都东, 侯润石, 邵家鑫, 等. X射线动态图像处理与焊缝缺陷自动检测 [C]. 镇江: 第十六次全国焊接学术会议, 2011.
Du D, Hou R S, Shao J X, et al. X-ray dynamic image processing and the automatic inspection of welding defects [C]. Zhenjiang: The Sixteenth National Conference on Welding, 2011.
- [20] 黄民, 李功. 焊缝超声无损检测中的缺陷智能识别方法研究 [J]. 中国设备工程, 2009 (4): 17–19.
Huang M, Li G. Research on the intelligent identification method of welding defects ultrasonic nondestructive testing [J]. China Plant Engineering, 2009 (4): 17–19.
- [21] 孟永奇. 激光技术在焊缝质量检测方法中的应用 [J]. 热加工工艺, 2013 (24): 225–227.
Meng Y Q. Study on weld seam quality detection by laser technology [J]. Hot Working Technology, 2013 (24): 225–227.