液压支架机器人智能焊接生产线研发与应用

任 怀 伟
(天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013)

摘 要:为提升液压支架焊接加工质量和生产效率,改善工人劳动环境,研发了液压支架焊接机器人智能焊接加工生产线。攻克了分层多道焊接、激光传感、格子间变形适应等关键技术,有效改进了机器人与液压支架焊接的适应性;研制了焊接机器人外部轴、工件夹具、生产线控制、智能物流等系统及装置,实现了工件自动上下料、型号自动识别、结构件全方位焊接等功能;基于 MES 制造执行系统建立了车间级的智能化生产管理系统,实现了整个车间的统一管理和数字化生产。车间级的智能化生产管理系统在山能重装塔高公司工业性试验 6 个月,应用结果表明:焊接效率提高 100%,人员减少 70%,自动焊接产品质量稳定一致,满足生产智能化、流程自动化、管理信息化的发展要求。

关键词:液压支架焊接;机器人;智能生产线;车间信息化
中图分类号:TG47;TD35 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2017)05-0016-06

Development and application of robot intelligent welding production line to hydraulic powered support

Ren Huaiwei
(*Department of Mining and Design, Tiandi Science and Technology Company Limited, Beijing* 100013, *China*)

Abstract: In order to improve the welding processing quality and production efficiency of the hydraulic powered support and to improve the working environment of the workers, an intelligent hydraulic powered support welding and production line with a welding robot was researched and developed. A layer multi pass welding, laser sensing, grid deformation adaptive and other key technology were overcame and could effectively improve an adaptability between the robot and the hydraulic powered support welding. The external shaft of the welding robot, work piece fixture, production line control, intelligent logistics and other system as well as devices were researched and developed and the functions of the work piece automatic loading and unloading, autoMatic type identification, all directional welding of the structural piece and others were realized. Based on the MES (Manufacturing Execution System), a workshop type intelligent production management system was established and a general management and digitalized production of the whole workshop was realized. The workshop intelligent production management system had a 6 month industrial trial in Tagao Company, Shandong Energy Heavy Equipment Manufacturing Group Corporation Limited. The application results showed that the welding efficiency was increased by 100%, the staff number was reduced by 70% and the automatic welding product quality was stable and same. The development requirements of the production intelligent, process automation and management informationization could be met.

Key words: welding of hydraulic powered support; robot; intelligent production line; workshop informationization

0 引 言

我国高端液压支架自 2004 年实现完全国产化以来,支护阻力及工作高度都大幅增加,主体材料也由原来的 Q450 发展到以 Q690、Q890 为主[1-3]。大采高开采以及越来越多的深部开采使得液压支架承受着更加严峻的考验,发生扭转、偏载及冲击的概率上升,设备强度及可靠性要求更高。以中厚板焊接

收稿日期:2017-02-09;**责任编辑**:赵 瑞 **DOI**:10.13199/j.cnki.cst.2017.05.003
基金项目:国家智能制造装备发展专项资助项目(发改办高技[2012]2144 号);山西省煤基重点科技攻关资助项目(MJ2014-08);中央国有资本经营预算重点产业转型升级与发展资金资助项目(财企 2013-472)
作者简介:任怀伟(1980—),男,河北廊坊人,副研究员,博士。Tel:010-84263142,E-mail:renhuaiwei@ tdkcsj.com
引用格式:任怀伟.液压支架机器人智能焊接生产线研发与应用[J]. 煤炭科学技术,2017,45(5):16-21.
Ren Huaiwei.Development and application of robot intelligent welding production line to hydraulic powered support[J]. Coal Science and Technology,2017,45(5):16-21.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

而成的箱形结构件是液压支架承受重载、冲击的主要部件,因而其焊接质量直接影响工作面安全生产[4]。虽然液压支架材料和性能都有了大幅升级,但由于结构的特殊性和工艺的复杂性,其焊接加工仍然停留在手工阶段。不但工人劳动强度大、生产效率低,而且无法保证焊接的稳定性和焊接质量的一致性,成为影响液压支架品质及产业升级的瓶颈。

随着先进制造及自动化技术的蓬勃发展,机器人焊接得到广泛关注[5-7],并成为提高焊接效率和质量的有效手段,在工程机械、汽车制造领域得到了普遍的推广应用。然而,液压支架需要进行中厚板的多层多道焊接,且液压支架以短距离、立体式交叉焊缝为主,焊缝密集,焊接可达性差;再加上工件定位、拼装精度达不到要求,实现整个液压支架结构件的机器人焊接自动化难度非常大。即使是德国 DBT 公司和美国 JOY 公司这些国际液压支架生产技术领域的先进公司,也只是对结构件局部采用了自动化焊接,也没有形成自动化焊接批量流水线生产[8]。

为实现液压支架机器人焊接,在 2012 年国家智能制造发展专项项目"高端液压支架智能焊接加工车间"项目的支持下,开展了液压支架机器人焊接关键技术研究及装备研制,解决了液压支架焊接工作站结构形式及工艺流程优化、生产线自动控制、焊接误差检测及补偿控制等阻碍焊接机器人在支架制造中应用的关键技术难题,实现了机器人在煤机装备制造过程中的规模化应用,大幅推动了我国基础工业加工制造水平的提高,在向以设计数字化、制造智能化、生产网络化为特征的新型工业生产模式的方向上迈进了一大步。

1　液压支架机器人智能焊接系统构成

现有液压支架生产与机器人自动化焊接在工艺顺序、精度控制、生产效率等方面存在诸多兼容性问题[9-11],因此需对液压支架焊接的整个生产系统进行硬件创新、技术升级、工艺优化和流程再造,在焊前预处理、生产过程和焊后处理 3 个阶段全面应用自动化控制技术和新的工艺流程,解决影响自动化焊接质量和效率的技术问题。

焊前预处理系统(图 1)主要是完成钢板的切割下料和拼装组对,为焊接系统准备待焊工件。主要解决提高下料、组对焊接的精度和提高材料利用率的问题。以零件材料的最优化利用为目标,研究开发下料流程管控系统,完成物料信息记录、生产计划安排和流程管理。系统通过车间网络将优化后的切割图纸下达至数控等离子切割机、坡口切割机器人等自动化设备,实现板材的高利用率、高精度加工,为精确组装被焊工件奠定基础。

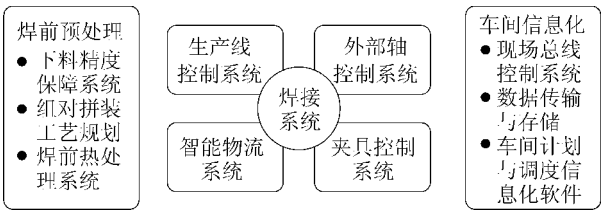


图 1　液压支架智能焊接系统关键技术及其逻辑关系

Fig. 1　Key technology and its relation of intelligent welding system for hydraulic support

车间信息化系统则对车间所有焊接设备进行集中监控,基于 MES 制造执行系统打造车间级的智能化生产管理系统,解决数据格式兼容性、通信协议统一化等难题,进行生产计划安排、信息分析统计,实时监测设备状态,全面记录操作过程、配件更换、维修等信息,实现整个车间的统一管理和数字化生产。

机器人焊接系统是液压支架智能化焊接研究的核心,重点解决液压支架结构件格子间自动化焊接技术难题,并研发配套的焊接生产线、外部轴系统、夹具及物流 4 类子系统。

2　液压支架机器人智能焊接技术及配套子系统

2.1　液压支架机器人智能焊接技术

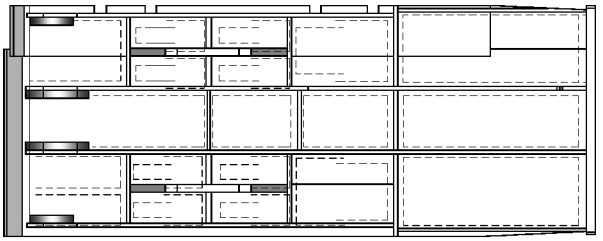
焊缝的自动化多层多道焊接是液压支架机器人焊接的核心技术,除需要焊接机器人具备焊缝起始点快速寻位、电弧跟踪、多层多道焊缝自动生成等功能外,还需要攻克支架焊接特有的难题,即焊接变形控制、格子间形状自适应及焊缝截面动态感知。

1)分层多道焊接技术。如图 2 所示,液压支架结构件为对称结构,焊接时应采用双机器人或四机器人实施对称焊接,以控制焊接变形。同时,在进行局部多个焊缝焊接时,人工焊接通常都是先对所有焊缝进行整体打底,再进行盖面焊接。即先焊接所有焊缝的第 1 道焊缝,再完成所有焊缝的盖面焊接。但目前多数机器人无法实现这一功能,因为机器人的多层多道焊接功能是根据打底焊接形成焊接参数、轨迹及焊缝形状自动生成盖面焊接程序的,必须一次性完成 1 条焊缝的多层多道焊接。若先进行多个焊缝的打底焊,则其无法记录每条焊缝的信息,也就无法生成盖面焊接程序,因而无法实现多道焊缝

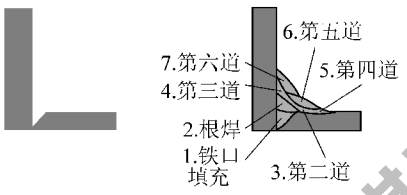
中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

的分层多道焊接。

为解决这一问题,开发了焊接液压支架专用的分层多道焊接程序及数据库,同时记录最多 10 条焊缝的打底焊信息,并将自动生成的盖面焊接的每一道焊接工艺参数写入数据库,且与其所属焊缝的焊接顺序一一对应,从而实现分层多道焊接。该技术对液压支架自动化焊接至关重要,它解决了集中焊接局部焊缝造成的热输入量过大的问题,从而减小焊接变形及内应力,有效改善结构件的焊后力学状态。



(a) 分层多道焊接技术



(b) 焊接前　(c) 焊接后

图 2　液压支架分层多道焊接技术及焊接前后效果

Fig. 2　Multi-pass welding technology of hydraulic support in different layers and effect before and after welding

2)格子间变形适应性技术。现有机器人焊接程序需要将格子间与底板形成的焊缝识别为 4 条焊缝,每条焊缝都需要执行起始点寻位、焊缝类型识别、多层焊接参数生成等程序,焊接效率大幅降低;同时,这些焊缝的起弧点都在格子间的 4 个角处,易产生应力集中,降低焊缝强度。通过现场研究发现,加工和拼装组对产生的精度误差,反映到结构件格子间尺寸的变化就是整体放大或缩小。因此,改变 4 条焊缝独立焊接的方式,将格子间底部焊缝作为 1 条完整焊缝,通过检测格子间对角线长度来判断焊缝尺寸变化,有效提升检测及焊接效率;同时将起弧点设置在焊缝中央,减少应力集中,如图 3 所示。

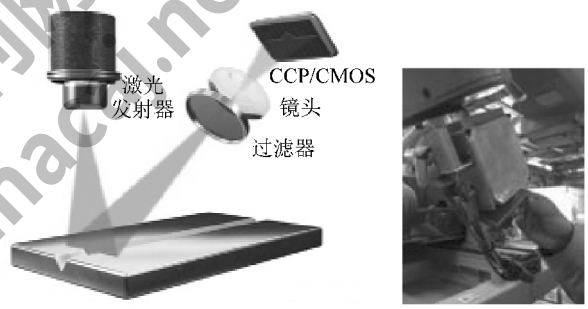
3)激光跟踪技术。因加工、拼装及内部焊接后工件变形等影响,结构件表面焊缝尺寸通常与编程尺寸相差较大。为自动适应焊缝尺寸和截面参数的随机变化,首次将激光焊缝跟踪技术[12-13]应用于液压支架结构件外焊缝焊接。如图 4 所示,激光跟踪传感器被安装在焊枪上端,通过捕捉焊缝反射的条纹,计算生成焊缝截面尺寸。基于液压支架焊缝成型特征,激光传感器只扫描焊缝起点、终点和中间 3 个位置的信息,差值形成整条焊缝的实际形状,作为焊接过程中调节焊接参数(焊接速度、填充量)的依据。这样,既可以高精度地获取焊缝信息,又能够最大限度地提高探测效率。焊缝跟踪只用于打底焊缝焊接过程,盖面焊接参数仍自动生成。



(a)　(b)

图 3　液压支架结构件格子间焊缝

Fig. 3　Weld seam between structural parts lattice of hydraulic support



(a) 激光跟踪技术原理　(b) 激光跟踪传感器

图 4　激光跟踪技术原理及激光跟踪传感器

Fig. 4　Principle of laser tracking technology and laser tracking sensor

上述 3 项关键技术解决了液压支架格子间结构在低加工精度条件下的高效焊接难题,使机器人自动化焊接适应了液压支架的生产特点,有效推动了焊接机器人在煤机装备制造领域的规模化应用。

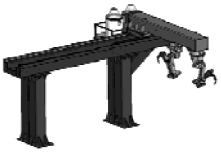
2.2　液压支架机器人智能焊接子系统研发

在解决技术难题的同时,还必须研发与之相适应的硬件系统[14-15],包括与机器人焊接控制系统配套的外部轴、工件夹具、生产线、物流等子系统及装置,从而实现液压支架结构件焊接、翻转、上下料、运输等工艺流程的自动化。

1)外部轴结构及控制系统。为实现工件多角度、全方位焊接,在机器人 6 自由度的基础上增加若干外部轴,使焊枪与工件上的多数焊缝都有最佳的焊接位置[16]。机器人龙门架及工件变位机均属于

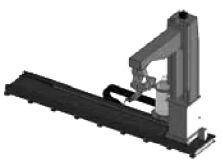
中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

外部轴系统。针对不同类型工件设计开发了大贴板、小贴板、连杆、结构件内、外焊缝 5 种外部轴结构,如图 5 所示。同时,开发了外部轴控制系统,如图 6 所示。实现机器人-外部轴联动控制、工件选择、设备状态监测、报警查看等功能。


(a) 连杆焊接工作站外部轴


(b) 小贴板焊接工作站外部轴


(c) 内焊缝工作站外部轴


(d) 外焊缝工作站外部轴

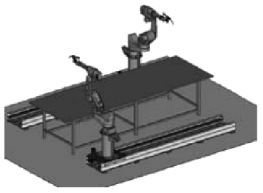

(e) 大贴板工作站外部轴

图 5　5 种不同工作站的外部轴系统

Fig. 5　External axis systems of five different workstations



(a) 控制系统界面



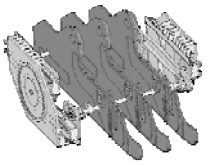
(b) 支架控制界面

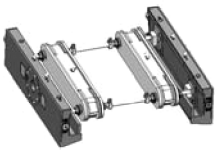
图 6　外部轴控制系统界面

Fig. 6　Interface of external axis control

2)夹具及控制系统。为实现工件的自动化上下料及与焊接系统的协调联动,针对不同工件研发了开发 4 种夹具结构,如图 7 所示。同时,开发夹具控制系统(图 8)与焊接及外部轴系统通信,实现联动闭锁、状态监测、工件型号监测等功能。

3)生产线控制系统。在机器人工作站结构创新的基础上,研究焊接生产线系统以提高生产效率[17]。如图 9 所示,连杆生产线采用相同结构形式的工作站完成连杆一次焊接(内焊缝)和二次焊接(外焊缝),由物流系统自动上下料工件。一次焊接和二次焊接时间周期不同,生产线控制系统(图 10)可根据生产计划安排自动调配工作站的数量,完成 2 次焊接产能的自适应匹配,实现设备的高效利用。


(a) 小贴板夹具


(b) 连杆夹具


(c) 内焊缝工作站及其夹具

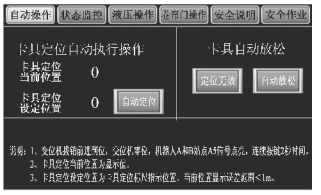

(d) 外焊缝工作站及其夹具

图 7　4 种适应不同工件的夹具结构

Fig. 7　Four kinds of fixtures structure adapted to different workpieces



(a) 夹具状态监控



(b) 夹具自动控制

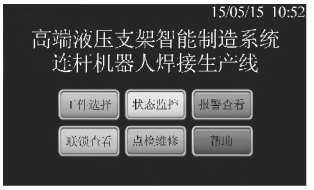
图 8　夹具控制系统界面

Fig. 8　Interface of fixture control system

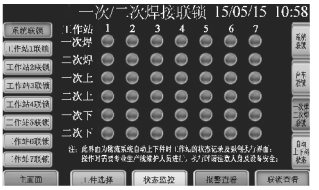


图 9　连杆焊接生产线

Fig. 9　Production line of leg welding



(a) 生产线控制系统界面



(b) 设备状态监控

图 10　连杆焊接生产线控制系统

Fig. 10　Leg welding production line control system

4)物流系统。物流系统主要与生产线系统配合,完成工作站内上下料,工作站到上、下料架之间的工件运输,工件型号判断等功能。如图 11 所示,物流系统由 RGV 物流小车及导轨、上、下料架及控制系统组成;物流控制系统(图 12)用于整条生产线的运行控制和安全检测。



(a) 物流小车　　(b) 上、下料架

图 11　物流小车及上、下料架

Fig. 11　Logistics trolley and loading/unloading material rack



(a) 物流系统状态　　(b) 物流系统控制

图 12　物流控制系统界面

Fig. 12　Interface of logistics control system

3　基于 MES 的智能化生产管理系统

液压支架机器人焊接优化了生产工艺,产品质量、生产效率显著提升[18-19],为有效监控焊接过程、提升车间管理水平[20],开发了基于 MES 的智能化生产管理系统,解决了数据格式兼容性、通信协议统一化等难题,具有生产计划安排、信息分析统计、设备状态实时监测等功能,全面记录操作过程、配件更换、维修等信息,实现整个车间的统一管理和数字化生产。

生产设备监控界面如图 13 所示,智能化生产管理系统采用两级数据传输+三级终端显示的模式,在车间设备、工人、集控室、总厂调度中心之间实现数据交互以及终端显示对话,从而形成统一的整体,实现整个焊接车间生产的信息化、自动化。

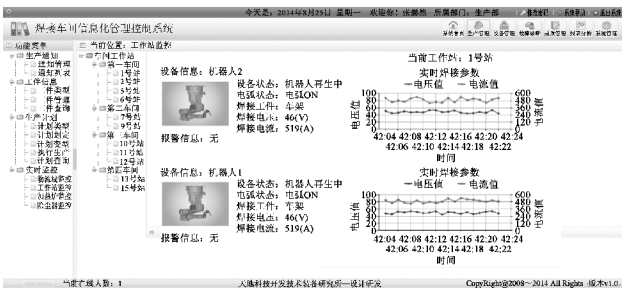


图 13　生产设备监控界面

Fig. 13　Interface of equipment monitoring

系统基于 B/S 架构,采用 Oracle 数据库、VS2010 软件开发,可采集焊接机器人工作站、加工中心和其他设备的相关信息,实现对车间内所有生产信息的监视和控制,并能对设备操作和管理人员进行授权管理。

4　结　　论

应用上述关键技术及新装备,在山能重装塔高公司建成了国内最大、自动化程度最高的中厚板多层多道焊接加工车间。该车间自 2015 年 3 月起至 2015 年 8 月,经过 6 个月的工业性试运行,累计完成 6 种型号液压支架主筋贴板、连杆及结构件(顶梁、掩护梁及底座)共计 10 000 余件的焊接。液压支架年生产能力可达到 2 000 架,效率较人工焊接提高 100%,操作人员减少 70%。

液压支架智能焊接加工关键技术的突破及自动化车间的建设,是智能制造技术在传统重型工业产品生产中的推广应用,改变了传统的结构件手工焊接生产模式,形成了以机器人焊接为主、人工补焊为辅的自动化焊接流水线模式。液压支架机器人焊接可长时、稳定作业,有效保证了结构件焊接质量,增强了液压支架整机的可靠性。同时,液压支架结构件自动化作业生产工序与焊接工艺,减少了结构件单项焊接所需的吊装、搬运和工件找准、找正时间,提高了生产效率,并有效改善了工作环境、降低了工人劳动强度。液压支架焊接加工模式的升级,有力地增强了我国煤炭装备企业的生产能力和市场竞争力,对加快整个煤炭行业的转型升级具有重要作用。

参考文献(References):

[1]　王国法.高端液压支架关键技术研究与产业化进展[J].煤炭科学技术,2011,39(4):78-83.
Wang Guofa. Research and industrialization progress on end hydraulic support key technology[J].Coal Science and Technology, 2011,39(4):78-83.

[2]　王国法.液压支架技术体系研究与实践[J].煤炭学报,2010,35(11):1903-1908.
Wang Guofa.Theory system of working face support and hydraulic support technology[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11):1903-1908.

[3]　王国法.煤矿高效开采工作面成套装备技术创新与发展[J].煤炭科学技术,2010,38(1):63-68,106.
Wang Guofa.Innovation and development of completed set equipment and technology for high efficient coal mining face in underground mine [J].Journal of China Coal Society,2010,38(1):63-68,106.

[4]　曹连民,孙云鲁,庞　斌,等.液压支架制造工艺技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(4):83-88.
Cao Lianmin, Sun Yunlu, Pang Bin, *et al*. Study on manufacturing technology of hydraulic powered support[J].Journal of China Coal Society,2016,44(4):83-88.

[5]　Xu Y L, Lyu N, Zhong J Y, *et al*. Research on the real-time track-

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.com

ing information of three-dimension welding seam in robotic GTAW process based on composite sensor technology[J].Journal of Intelligent and Robotic System,2012,68:89-103.

[6] Wei S C, Ma H B, Lin T, *et al*. Autonomous guidance of initial welding position with single camera and double positions method [J].Sensor Review,2010 (30):62-68.

[7] Doyoung Chang, Donghoon Son. A new seam-tracking algorithm through characteristic-point detection for a portable welding robot [J].Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2012,28 (1):1-17.

[8] 马宏伟,王昆峰,张旭辉.综采液压支架焊接机器人的发展现状及展望[J].煤矿机械,2008,29(6):1-3
Ma Hongwei,Wang Kunfeng,Zhang Xuhui.Development of automated welding equipment and prospect of fully mechanized coal mining powered support[J].Coal Mine Machinery,2008,29(6):1-3.

[9] 许志明,李永军.液压支架焊接工艺装备现状及机器人焊接技术解决方案[J].电焊机,2009,39(4):76-78.
Xu Zhiming, Li Yongjun. Actuality of welding equipment for hydraulic support and solution of welding robot technology[J].Electric Welding Machine,2009,39(4):76-78.

[10] 王亮忠,樊哲亮.焊接机器人工作站在液压支架结构件焊接中的应用研究[J].煤矿机械,2013,34(7):119-121.
Wang Liangzhong, Fan Zheliang. Application research of welding robot working station in welding process of powered roof support structures[J].Coal Mine Machinery,2013,34(7):119-121.

[11] 李海宁,纪茂峰.液压支架焊接工艺装备现状与自动化焊接技术解决方案[J].煤矿机械,2006,27(5):825-826.
Li Haining, Ji Maofeng. Status of weld equipment and project to robotize weld process for powered support producing[J]. Coal Mine Machinery,2006,27(5):825-826.

[12] Graaf De Menno, Aarts R.Real Time seam tracking for robotic laser welding using trajectory-based control[J].Control Engineering Practice,2010,18:944-953.

[13] Wei Huang, Radovan Kovacevic. A laser-based vision system for weld quality inspection[J].Sensors,2011(11):506-521.

[14] 范剑英,赵光明.机器人自动焊在液压支架结构件制造中的应用[J].机械工程与自动化,2015,192:205-206.
Fan Jianying, Zhao Guangming. Application of robot automatic welding in manufacturing of hydraulic support parts[J].Mechanical Engineering & Automation,2015,192:205-206.

[15] 赵喜增.高端液压支架自动化焊接工艺和装备的应用[J].煤矿机械,2013,33(4):139-140.
Zhao Xizeng. Application of end hydraulic support automated welding technology and equipment[J].Coal Mining Machinery,2013,33(4):139-140.

[16] 刘　娜,周　丹,张翔宇,等.液压支架焊接机器人动力学仿真[J].煤炭技术,2016,35(2):256-259.
Liu Na,Zhou Dan,Zhang Xiangyu,*et al*. Dynamics simulation of welding manipulator for hydraulic support[J].Coal Technology,2016,35(2):256-259.

[17] 管　凯.液压支架顶梁高效焊接生产线方案设计及其关键技术的研究[D].镇江:江苏科技大学,2015.

[18] 薛　亮.煤矿液压支架结构件的焊接工艺探讨[J].能源与节能,2015(7):152-153.
Xue Liang.Discussion on welding process of coal mine hydraulic support structure [J].Energy and Conservation,2015(7):152-153.

[19] 陈　连.高端液压支架机械加工工艺研究[J].煤矿机械,2015,36(2):157-158.
Chen Lian.Research on machining process of high-end hydraulic support machine[J].Coal Mining Machinery,2015,36(2):157-158.

[20] 曹成铭,李圣文,张延亮,等.高端液压支架智能焊接车间信息化建设探讨[J].矿山机械,2013,41(1):104-106.
Cao Chengming,Li Shengwen,Zhang Yanliang,*et al*.Investigation on information construction of intelligent welding workshops for manufacturing advanced hydraulic support[J].Mining & Processing Equipment,2013,41(1):104-106.

(上接第 8 页)

work-assisting robot system [J]. Advanced Robotics, 2002, 16 (6):481-484.

[37] Yoshifumi Isozaki,Kimikazu Nakai.Development of a work robot with a manipulator and a transport robot for nuclear facility emergency preparedness[J].Advanced Robotics,2002,16(6):489-492.

[38] Magnuson S.Search-and-rescue robots needed, but market has yet to develop[J].National Defense,2011,96:24-26.

[39] Qian K,Song A,Bao J,*et al*.Small teleoperated robot for nuclear radiation and chemical leak detection[J].International Journal of Advanced Robotic Systems,2012,9(5):637-647.

[40] Vallance M,Naamani C,Thomas M,*et al*.Applied information science research in a virtual world simulation to support robot-mediated interaction following the fukushima nuclear disaster [J]. Communications in Information Science & Management Engineering,2013,3(5):222-232.

[41] 贾现军.小型水下救援机器人位姿控制及其在水下搜救中的应用[D].杭州:浙江大学,2014.

[42] 茅及愚."海沟号"潜入万米海底[J].机器人技术与应用,1996(2):25-26.
Mao Jiyu."Trench" sneak into the submarine [J].Robot Technique and Application,1996(2):25-26.

[43] Linda.水下机器人的功能越来越强大 [EB/OL].[2016-09-09].http://www.robot-china.com/news/201307/08/4823.html.

[44] 中船重工.七二所研制消防用浅水域水下搜救机器人[EB/OL].[2016-10-02].http://www.csic.com.cn/zgxwzx/zgcydt/307662.htm.

[45] 谭　思.美国海军派出水下机器人搜寻马航失联客机 [EB/OL].[2016-10-02].http://tech.qq.com/a/20140403/020466.htm.

[46] CPP.韩国使用"螃蟹机器人"搜救沉没客轮[EB/OL].[2016-10-02].http://news.163.com/photoview/00AO0001/57165.html#p=9QGK80FA00AO0001.

[47] 常熟日报生活家.水下搜救机器人发现遇难者[EB/OL].[2016-09-09].http://mt.sohu.com/20160607/n453487819.shtml.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net