

发动机小尺寸燃油管焊接工艺优化研究

许海烽¹, 李笑¹, 赵诚亿¹, 王发², 刘美川², 戴军³

1. 江苏耀坤液压股份有限公司 江苏江阴 214400

2. 锐新昌科技(常熟)有限公司 江苏常熟 215500

3. 常熟理工学院汽车工程学院 江苏常熟 215500

摘要: 针对发动机小尺寸燃油管手工焊接存在的效率低、焊缝质量不稳定等问题, 开展面向小尺寸燃油管的机器人电弧焊技术焊接参数优化的研究。基于试验设计方法(DOE), 对焊接参数进行试验, 得到最优参数组合, 即焊接速度为42cm/min、送丝速度为8.5m/min、修正电弧长度为-2mm, 初始焊接电流为120A。采用优化后的焊接参数进行批量生产, 产品满足生产质量要求, 对小尺寸燃油管的制造具有一定的指导意义。

关键词: 燃油管; 机器人焊接; DOE设计; 焊接参数

Research on optimization of welding process for small sized fuel pipe of engine

XU Haifeng¹, LI Xiao¹, ZHAO Chengyi¹, WANG Fa², LIU Meichuan², DAI Jun³

1. Jiangsu hydraulic oil pipe Co., Ltd., Jiangyin 214400, Jiangsu, China

2. Ruixinchang Technology (Changshu) Co., Ltd., Changshu 215500, Jiangsu, China

3. School of Automotive Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, Jiangsu, China

Abstract: To solve the issues of low welding efficiency and unstable weld quality in manual welding of small-sized fuel pipes for engines, research on optimizing the process parameters of robot arc welding technology for small-sized fuel pipes is conducted. Based on the Design of Experiments (DOE) method, experiments were conducted on the process parameters of arc welding to obtain the optimal process parameters. The optimal solution was a welding speed of 42cm/min, wire feeding speed of 8.5m/min, corrected arc length of -2mm, and initial welding current of 120A. The research results in the paper has certain guiding significance for the production and manufacturing of small-sized fuel pipes.

Keywords: fuel pipes; robot welding; DOE design; welding parameters

1 序言

油管是液压缸关键零部件, 其焊缝质量至关重要。为降低机械故障率、提高工作效率, 市场对油管焊接质量的要求日益提高。针对现有油管手工焊接存在的效率低、焊缝成形差, 以及工作环境恶劣

等方面的问题, 本文开展面向液压油管的机器人电弧焊技术研究。目前, 实现焊接自动化、柔性化与智能化已成为必然趋势, 采用机器人焊接也已成为焊接技术自动化的重要标志^[1-4]。本文以发动机用小

基金项目: 江苏省产学研合作项目(BY2021279)。

通信作者: 戴军, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料连接技术, E-mail: jdaijs@163.com。

尺寸燃油管为对象，采用机器人电弧焊技术进行焊接，基于试验设计方法（DOE），优化焊接参数，控制焊接变形量，以期获得满意的焊接质量。

2 试验材料及方法

机器人弧焊系统如图1所示。该系统主要由ABB多轴机器人、Fronius TPS400焊机、自动送丝机和焊接工装夹具等组成。油管材料为20钢，油管壁厚3mm，块体套在油管上，对块体和油管进行角焊缝焊接。焊接过程采用GMAW方法，焊丝采用ER70S-6，直径为1mm，直流反接，保护气体采用88%Ar + 12%CO₂。母材和焊丝化学成分见表1。



图1 机器人弧焊系统

表1 油管母材和焊丝化学成分（质量分数） (%)

元素	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	Fe
20钢	0.17~0.23	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.035	≤0.035	≤0.30	≤0.25	≤0.25	余量
ER70S-6	≤0.09	0.8~1.1	1.4~1.6	≤0.03	≤0.03	≤0.2	≤0.2	≤0.5	余量

3 试验结果及讨论

由于焊接过程中参数较多，本文只针对主要的焊接参数进行调整优化，通过前期的试验数据分析，先固定部分参数，其中焊接电流141A、电弧电压22.4V、气体流量15L/min及焊枪角度40°。选取焊接速度、送丝速度、修正电弧长度及初始焊接电流共4个参数作为试验因子，且每种因子具有3水平，即3个不同的取值。在设计试验过程中，运用DOE正交试验法可以减少试验次数，综合考虑本试验中试验因子数和水平数，选用L9正交试验表进行试验设计（见表2）。由表2可知，因素1为焊接速度、因素2为送丝速度、因素3为修正电弧长度、因素4为初始焊接电流。

表2 L9正交试验表

试验编号	焊接速度 / (cm/min)	送丝速度 /(m/min)	修正电弧长度/mm	初始焊接电流 /A
1	42	7.5	-2	110
2	42	8	-3	120
3	42	8.5	-4	130
4	44.1	7.5	-3	130
5	44.1	8	-4	110
6	44.1	8.5	-2	120
7	50.7	7.5	-4	120
8	50.7	8	-2	130
9	50.7	8.5	-3	110

在试验设计中，预先确定焊接工艺DOE正交试验指标，将焊接熔深作为试验指标。DOE正交试验获得的焊缝横截面如图2所示。从图2可看出每条试验焊缝的熔深、熔宽。如果焊缝熔深小，则会导致角焊缝在交界处易产生未熔合等缺陷。

测量获得的焊缝熔深具体数据结果见表3。由表3可知，熔深最大的是3[#]试样，为4.08mm；熔深最小的是7[#]试样，为3.19mm。

研究4种试验因子对焊缝熔深的影响，在分析过程中采用直观分析法，运用极差来研究各焊接参数对这两个试验指标的影响。极差是指该因子各水平均值的最大值与最小值的差，若极差大，则改变这一因子的水平会对试验指标造成较大的影响，反之影响较小^[5]。

通过计算各试验因子获得的熔深和极差数据见表4。首先从表4可看出，焊接速度对焊缝熔深的影响最大，极差达到了0.46mm；其次是送丝速度和修正电弧长度，二者的极差分别为0.44mm和0.27mm；而初始焊接电流的极差最小，为0.14mm，对焊缝熔深的影响最小。

分析各因子对焊接强度和焊接时间的影响大小，DOE正交试验分析汇总结果见表5。其中，A、B、C、D分别代表4种试验因子，1、2、3分别代表

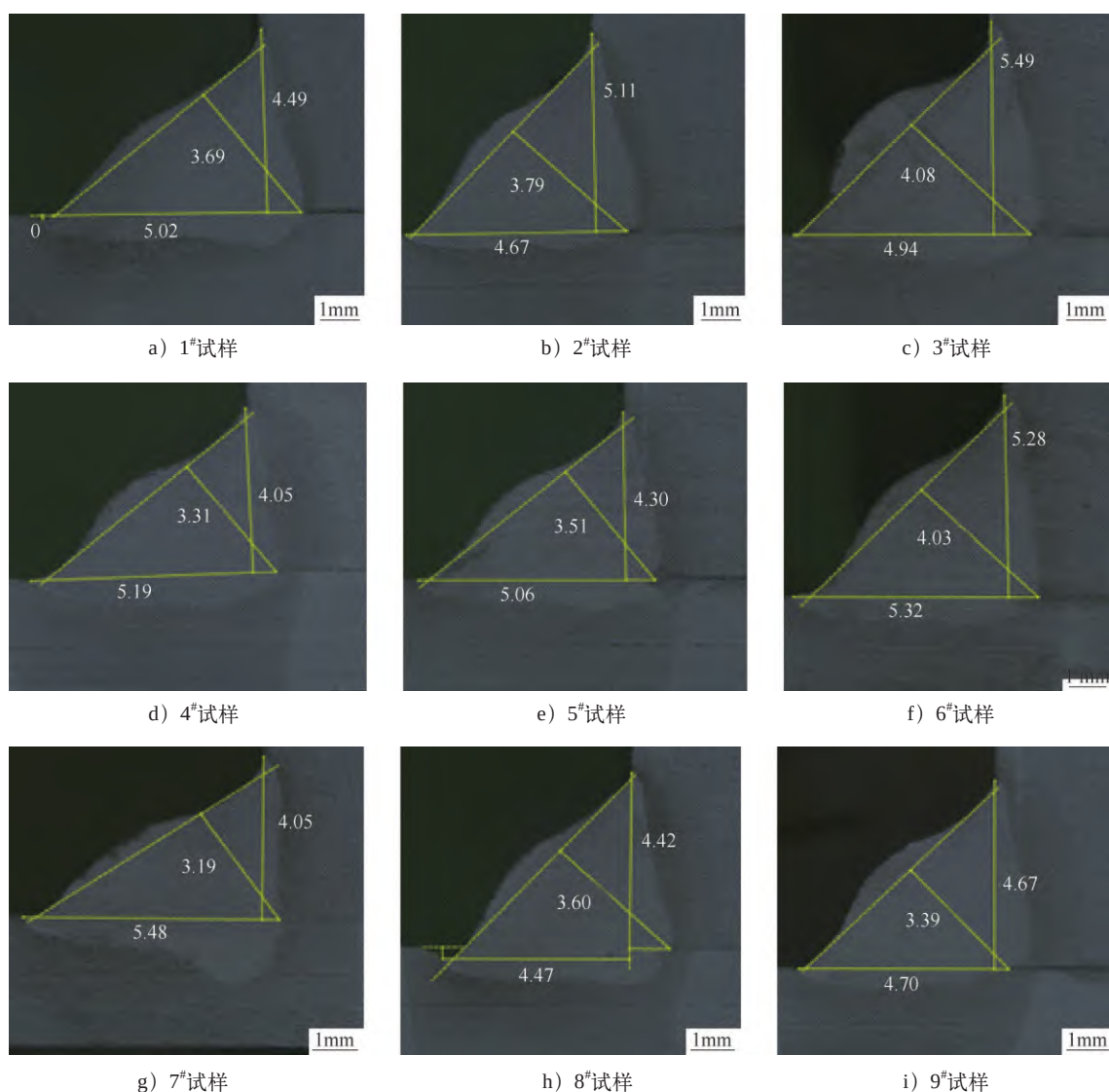


图2 9组试样对应的焊缝横截面

表3 试样对应的熔深数据结果 (mm)

试验编号	焊缝熔深
1	3.69
2	3.79
3	4.08
4	3.31
5	3.51
6	4.03
7	3.19
8	3.60
9	3.39

各试验因子的3种水平。例如：A1表示激光功率这一因子的第1水平，C2表示焊接速度这一因子的第2水平。

从表5可看出，最有利的影响因子水平为A1、B3、C1、D2，即优化后的最佳焊接参数为焊接速度42cm/min、送丝速度8.5m/min、修正电弧长度-2mm及初始焊接电流120A。采用此焊接参数进行焊接试验，焊缝横截面如图3所示。由图3可知，焊缝横截面饱满，与母材熔合充分，并且没有缺陷，焊缝熔深满足要求。

在试验完成后进行变形测量和实际生产。根据优化后的参数进行了实际焊接，焊接后的产品（见图4）满足质量要求。

表4 DOE正交试验的均值和极差 (mm)

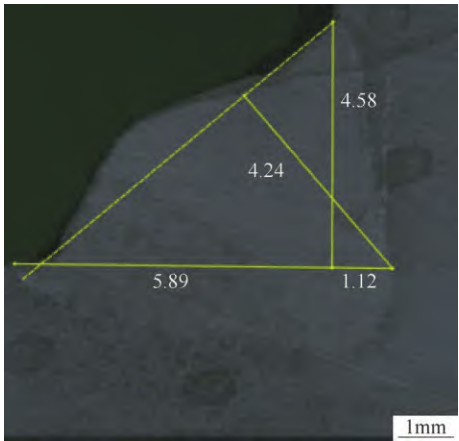
试验因子	焊缝熔深	焊缝熔深极差
焊接速度	3.85	0.46
	3.62	
	3.39	
送丝速度	3.39	0.44
	3.63	
	3.83	
修正电弧长度	3.77	0.27
	3.50	
	3.59	
初始电流	3.53	0.14
	3.67	
	3.62	

表5 DOE正交试验分析结果汇总

试验指标	因子重要性	有利的影响因子水平			
焊接熔深	A、B、C、D	A1	B3	C1	D2



a) 焊接接头



b) 焊缝横截面

图3 优化后的焊接接头及焊缝横截面



图4 焊接产品

4 结束语

1) 基于DOE正交试验，优化焊接参数，其最佳方案为 A1B3C1D2，即焊接速度为42cm/min、送丝速度为8.5m/min、修正电弧长度为-2mm及初始焊接电流为120A。

2) 根据DOE正交试验得到的最优焊接参数进行实际生产验证，并对其成品进行焊缝熔深验证，最终确定焊缝熔深得到提高，达到生产质量要求。

参考文献：

[1] 林本宏，王豪，魏昕，等. 液压油管机器人智能焊接关键技术研究[J]. 机床与液压，2018，46（3）：16-19.

[2] 张峰. 随车起重机结构件机器人焊接柔性生产线的应用[J]. 金属加工（热加工），2023（7）：52-55.

[3] 赵美刚，张黎犁. 管-管接长全自动焊接及智能化配套技术研究[J]. 焊接技术，2024，53（5）：72-76.

[4] 高珊，朱彦军，许绍君. 液压支架用Q890高强钢机器人焊接工艺研究[J]. 热加工工艺，2020，49（3）：130-133.

[5] 郭正松. 基于 DOE 的激光焊接工艺优化研究[J]. 现代信息科技，2019，3（12）：165-167.

(收稿日期：20241029)