

机器人自动脉冲 TIG 焊 J 形坡口焊缝填充策略

娄丽艳¹, 李 桓², 申俊琦², 谷 文³

(1. 天津职业技术师范大学 天津市高速切削与精密加工重点实验室, 天津 300222;

2. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072; 3. 中国第一重型机械集团核电石化事业部, 大连 116113)

摘 要: 核电压力容器封头由半球形封头和多个圆管相贯构成, 连接的焊缝为 J 形坡口, 轨迹是球管相贯的空间曲线, 位于封头内部。由于该焊缝的特殊性, 目前普遍采用手工焊接, 质量与效率不佳。文中针对核电压力容器封头 J 形坡口的机器人自动焊接技术提出了一种多层多道焊填充策略。通过焊接结构分析, 确定了 J 形坡口的焊接工艺分区, 提出了设定焊接层数、道数的焊接轨迹规划方法, 进而提出了焊接工艺参数的设定规则并据此对焊缝形状进行控制。结果表明, 应用文中提出的焊缝填充策略及焊缝形状控制方法可获得良好的焊缝成形。

关键词: J 形坡口; 自动脉冲 TIG 焊; 焊接工艺参数

中图分类号: TG 456 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2017)01-0051-05

0 序 言

核电压力容器是核岛至关重要的设备, 由筒体、上/下封头组成, 其中封头连接进出口接管与主管道, 关系整个核反应堆压力容器的安全, 运转过程中需承受高温、高压, 工作条件恶劣^[1]。封头和接管连接的焊缝是 J 形坡口, 位于封头内部, 轨迹是空间曲线, 形状复杂。接管与封头在不同位置相贯, J 形坡口的尺寸、形状不同。受到焊接空间位置、坡口特殊形状的限制, 目前普遍采用手工焊方法, 限制了焊接质量与效率。

脉冲 TIG 自动焊是一种高效、优质、经济、节能的先进焊接工艺, 可用于不易施焊的场合以及热敏感性高的金属材料焊接。文中以核电设备制造中 J 形坡口机器人自动焊接技术研究为背景, 针对核电压力容器封头 J 形坡口自动焊接开展了一系列分析, 提出了设定焊接层、道数的焊接轨迹规划方法, 确定了焊接工艺参数的设定规则并据此对焊缝形状进行了控制。

1 焊接结构分析

1.1 焊接结构分析

某种核电压力容器封头球面按一定规律分布了

65 个、13 组相同直径的圆孔, 每组相同直径的圆孔对应一个偏心距, 圆管在这些位置与封头相贯形成不同形状的相贯线, 即 J 形坡口(图 1)^[2]。J 形坡口根据偏心距分为 13 种类型, 相同类型 J 形坡口可采用相同的焊接工艺。

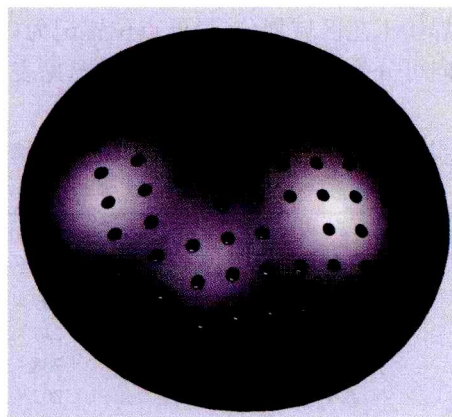


图 1 封头模拟图

Fig. 1 Simulated image of vessel head

在实际核电压力容器封头中, 圆孔直径远小于封头内球面直径, 可将任意位置孔周围的板材简化为平面, 将实际尺寸的空间相贯线视为平面曲线, 管与球面相贯的问题转化为管与平面相贯的问题进行分析^[2,3]。

将孔周围的板材部分简化为平面时, 可计算出不同位置简化模拟件的倾斜角度。58 号~65 号位

收稿日期: 2014-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475325); 天津市自然科学基金资助项目(14JCYBJC19100); 天津市高等学校创新团队培养计划资助项目(TD12-5043); 天津市高校“学科领军人才培养计划”资助项目(RC14-02)

置倾斜角度为 42° , 三维模拟图如图 2 所示。

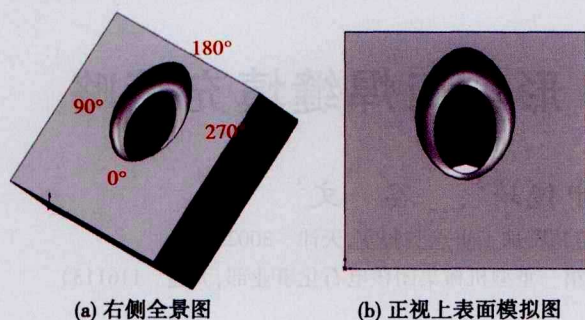


图 2 58 号 ~ 65 号模拟件三维图

Fig. 2 3D simulation figure of No. 56 ~ 65 workpiece

1.2 J 形坡口焊接工艺分区

J 形坡口焊缝是一条管板相贯的空间曲线, 而非规则形状。为了控制一圈焊缝在不同位置的成形, 要在不同位置采用不同工艺, 即对一圈焊缝进行工艺区域划分。

J 形坡口的空间曲线焊缝可看作由数段直线组成, 只要直线的长度和位置选取设置合理, 即可将误差控制在一定的范围内, 满足工艺要求。曲线与直线之间存在的误差, 即弓高误差, 可据此对焊接工艺区域进行划分^[4,5]。试验以弓高误差小于 1 mm 为依据, 对焊接工艺区域进行划分。

以 58 号 ~ 65 号位置坡口为例, 对空间焊缝曲线进行焊接工艺区域划分, 最低点位置记为 0° , 沿顺时针方向可分为 14 个区, 具体分区情况见表 1。

表 1 58 号 ~ 65 号位置坡口焊接工艺分区情况

Table 1 Welding process region of No. 58 ~ 65 workpiece

序号	区域范围/ $(^\circ)$	序号	区域范围/ $(^\circ)$
1	0 ~ 17	8	180 ~ 197
2	17 ~ 37	9	197 ~ 217
3	37 ~ 58	10	217 ~ 238
4	58 ~ 122	11	238 ~ 302
5	122 ~ 143	12	302 ~ 323
6	143 ~ 163	13	323 ~ 353
7	163 ~ 180	14	353 ~ 360

2 J 形坡口焊接轨迹规划

J 形坡口焊接是多层多道焊, 焊接完毕时要求填充材料与上表面堆焊层接近平齐, 因此, 焊接过程应保证每一层焊缝表面基本与封头表面平齐。焊前需分析 J 形坡口形状, 规划填充策略, 设置不同坡口的焊接层道数。

J 形坡口焊缝的特点是窄而深。对于 1 号位置坡口, 处于水平位置, 轴线与封头的球面中心线重

合, 坡口各截面的宽度和深度都相同。除 1 号坡口外, 其余位置坡口轴线均偏离封头中心线, 不同位置坡口尺寸形状差别较大, 需要根据坡口形状制定不同的填充策略。同时, 由于 J 形坡口沿封头表面存在高低落差 (1 号坡口除外), 坡口沿周向不同位置截面的宽度和深度尺寸不同。以 58 号 ~ 65 号位置坡口为例, $0^\circ \sim 180^\circ$ 截面图如图 3, 对于坡口宽度: 0° 位置最小, 180° 位置最大。对于坡口深度: 在坡口内侧, 0° 位置最大, 180° 位置最小; 在坡口外侧正好相反。 90° 和 270° 位置的宽度和深度居中。

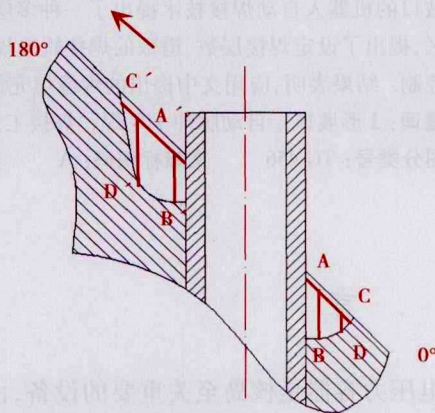


图 3 58 号 ~ 65 号位置坡口 $0^\circ \sim 180^\circ$ 截面示意图

Fig. 3 $0^\circ \sim 180^\circ$ cross-sectional view of No. 56 ~ 65 workpiece

不同位置 J 形坡口的尺寸形状决定了不同的焊接轨迹。对于 0 号位置坡口, $0^\circ \sim 360^\circ$ 坡口截面尺寸参数相同, 可采用同一焊接参数。对于 14 号 ~ 17 号位置坡口, 同一圈焊缝中, 0° 位置熔宽最小, 余高最大, 180° 位置熔宽最大, 余高最小, 90° 和 270° 位置的熔宽和余高取中间值。而对于 58 号 ~ 65 号位置 J 形坡口, 由前述该位置坡口尺寸特点可知, 就余高而言, 靠近坡口内侧的焊缝, 0° 位置余高 AB 大于 180° 位置余高 A'B'; 随着焊缝与坡口中心距离增大, 180° 位置余高逐渐增加, C'D' 远大于 CD。焊缝熔宽变化规律与其它位置 J 形坡口相同。

通过试验, 多道焊为保证焊缝间重叠量适宜, 焊缝表面高度变动小、层厚适中, 相邻焊道间路径间距应尽量为单道焊缝熔宽的 50% ~ 60%。对于 ERNi-CrFe-7 焊丝, 直流脉冲 TIG 焊获得的焊缝熔宽一般不超过 12 mm, 余高不超过 1.7 mm。在保证每层焊缝表面基本与坡口表面基本平行的前提下, 结合不同位置 J 形坡口尺寸参数, 可归纳出填充规则。

58 号 ~ 65 号位置 J 形坡口 $0^\circ \sim 180^\circ$ 截面位置焊缝规划图见图 4 (封头内壁预先堆焊不锈钢堆焊

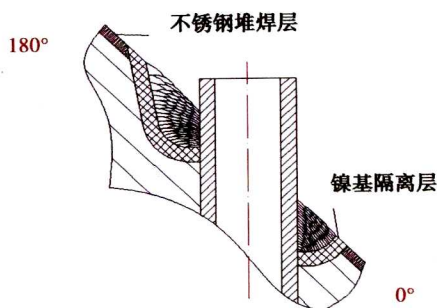


图 4 0° ~ 180° 截面位置焊缝规划示意图

Fig. 4 Distribution of multi-pass 0° ~ 180° cross section

层,坡口内壁堆焊镍基隔离层,焊接机器人在镍基堆焊层上进行 J 形坡口剩余空间的填充)。根据坡口尺寸,每层需焊 2~6 道,填充 19 层。当使用机器人对此 J 形坡口进行填充时,同一圈焊缝靠近坡口内侧,0°位置熔宽最小、余高最大,180°位置熔宽最大、余高最大;靠近坡口外侧,0°位置熔宽、余高均最小,180°位置熔宽、余高均最大。

3 焊接工艺参数设定规则

为通过规划的焊接层、道数使焊缝在尽量少的打磨量下将 J 形坡口填满,要建立焊接参数与焊缝几何尺寸之间的关系,对每一道焊缝的几何尺寸进行控制。试验通过确定填充金属熔化面积、焊缝熔宽与焊接工艺参数之间的关系来控制焊缝尺寸形状,进而设定焊接工艺参数^[6]。

3.1 固定焊接参数的设置

对于镍基合金焊接,为防止镍氧化,加强氩气对熔池的保护,尽可能采用短弧焊,选取弧长 3 mm ~ 5 mm。考虑到 J 形坡口形状的特殊性,钨极伸出长度尽量大,选取钨极伸出长度 6 mm。

焊点间距与焊接速度、脉冲频率之间的关系见式(1),设定焊点间距为 1.2 mm。试验中部分固定焊接工艺参数见表 2。

$$l_s = \frac{v_w}{6f} \quad (1)$$

式中: l_s 为焊点间距(mm); v_w 为焊接速度(cm/min); f 为脉冲频率(Hz)。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters

钨极直径 d /mm	弧长 L /mm	钨极伸出长度 L_w /mm	焊丝送入方式
3.2	3~5	6	前置送丝
脉冲幅比	占空比	氩气流量 $Q/(L \cdot \min^{-1})$	峰值电流 I_p/A
2	50%	8~12	150~300

3.2 填充金属熔化面积与焊接工艺参数

通过试验可知,在一定焊接参数范围内,填充金属熔化面积与焊接电流、工件倾斜角度关系不大,基本由焊接速度、送丝速度决定。填充金属熔化面积随焊接速度、送丝速度的变化结果见图 5。

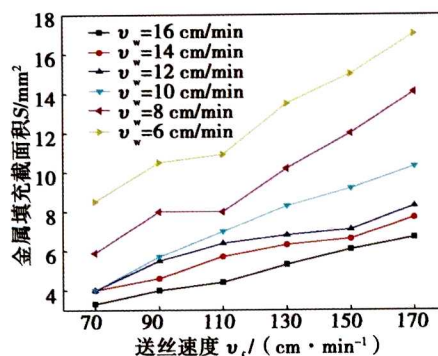


图 5 填充金属熔化面积与焊接速度和送丝速度关系

Fig. 5 Relationship between area of filler metal, welding speed and wire feeding speed

3.3 焊缝熔宽与焊接工艺参数

对焊缝熔宽影响较大的参数为焊接平均电流 I_a 、焊接速度 v_w 。采用工程中常用的二次完全式作为回归模型。即

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 \quad (2)$$

上式中自变量与实际物理量之间的对应关系见表 3。采用逐步回归方法,所得回归参数见表 4。

表 3 自变量与实际物理量对应关系

Table 3 Relationship between independent variables and physical quantity

方程自变量	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	x_1^2	x_2^2	$\hat{y}$
实际物理量	I_a	v_w	$I_a \cdot v_w$	I_a^2	v_w^2	w

表 4 回归参数表

Table 4 Regression parameters

回归模型	非标准化系数		回归系数	回归系	判定
	回归系数 b	标准误差	检验的 t 值	数检验 F 值	系数 R
常数项 b_0	63.635	24.156 47	2.634 274		
I_a	-0.693	0.291 48	-2.37 622	45.788	0.919 7
v_w	-0.364	0.047 396	-7.68 237		
I_a^2	0.002 27	0.000 871	2.611 674		

得到描述焊接平均电流 I_a 、焊接速度 v_w 和焊缝熔宽 w 的“最优”回归方程

$$\hat{y} = 63.635 - 0.693x_1 - 0.364x_2 + 0.002 27x_1^2$$

$$w = 63.635 - 0.693I_a - 0.364v_w + 0.00227I_a^2 \quad (3)$$

经检验,焊缝熔宽的回归公式计算值与实际测量值的相对误差在 8.33% 以内,可以满足文中试验中预测并控制焊缝形状的需要。

试验数据测量误差、焊接材料成分及焊接工艺参数均会影响回归方程的精确性。因此,此回归方程只适用于特定的试验条件,即文中试验条件。

3.4 J 形坡口焊接工艺参数设定

通过上述填充金属熔化面积与焊接工艺参数之间的关系和焊缝熔宽回归方程,可根据规划的 J 形坡口焊缝轨迹设定焊接工艺参数,根据规划的焊缝目标几何尺寸,计算填充金属熔化面积,通过图 5 确定符合条件的多对焊接速度和相应送丝速度,再通过焊缝熔宽最优回归方程确定最终工艺参数。

以 58 号 ~ 65 号位置坡口为例,焊接工艺参数规律如下,对于坡口内侧焊缝,0° 位置焊缝余高较大、熔宽较小,180° 位置焊缝余高较小、熔宽较大。可在 0° 位置附近采用较大的焊接速度和较小的送丝速度,与回归公式匹配较小的焊接电流形成熔宽小余高大的焊缝。送丝速度逐渐增大,焊接速度逐渐减小,匹配较大电流,在 180° 位置附近形成熔宽大余高小的焊缝。对于坡口外侧焊缝,180° 位置焊缝的熔宽、余高均大于 0° 位置。可在 0° 位置附近采用适中的焊接速度和较小的送丝速度,与回归公式匹配适中的焊接电流形成熔宽适中余高稍大的焊缝。送丝速度逐渐增大,焊接速度逐渐减小,匹配较大电流,在 180° 位置附近形成熔宽大余高大的焊缝。

由于焊接倾斜角度对焊缝尺寸形状的影响,上坡焊比下坡焊的熔宽小,上坡焊比下坡焊的余高大。所以,以 0° ~ 180° 位置连线为对称轴,对称位置的上坡焊要比下坡焊的焊接平均电流稍大,其他焊接工艺参数相同。

选取工艺参数时应注意镍基合金流动性差,焊接速度过大、焊接热输入过小,则填充金属不能与母材充分混合,焊接速度过小、焊接热输入过大,则镍基合金焊缝易出现粗大晶粒或热裂纹。试验证明,焊接速度应控制在 8 ~ 16 cm/min 内。

4 J 形坡口自动脉冲 TIG 焊焊接实例

4.1 试验设备与材料

试验用到的设备主要有 J 形坡口焊接机器人、直流脉冲 TIG 焊接电源、焊枪与送丝机。其中 J 形坡口焊接机器人是根据 J 形坡口焊缝特点设计的六自由度数控设备。

焊接电源为 Panasonic YC-400TX3 型 IGBT 控制

直流 TIG 弧焊电源。焊炬为 Panasonic YT-308TW 型 TIG 焊焊炬。送丝机为华恒 TB1501-000 型。由于 J 形坡口深而窄,采用 Panasonic 加长焊枪喷嘴。

封头模拟件材料为 SA508-3 钢,接管材料为含 Cr30% 的 Inconel690 合金,焊丝为直径 0.9 mm 的 ERNiCrFe-7。

4.2 J 形坡口自动脉冲 TIG 焊焊接实例

焊接前对焊接机器人和接管中心进行定位,使圆孔、接管和机器人三者的中心轴线尽量重合。定位后,清理 J 形坡口表面 15 mm 范围内的油、锈等污染物。焊前先对焊接轨迹进行示教,示教过程尽量保持钨极尖端距离工件表面为 6 mm。

焊接时,以焊枪正对坡口最低点 0° 作为起弧点,按正视坡口顺时针的方向进行焊接,在 375° 位置熄弧,保证起弧点和熄弧点之间有一定搭接量。

58 号 ~ 65 号位置 J 形坡口倾斜角度最大,坡口内尺寸参数差别最大,焊接难度最高,以该位置的焊接实例进行分析。以该位置 J 形坡口的第 3 层第 2 道焊接为例,如表 5 所示,共 14 个焊接工艺区域。按照如前所述焊接参数选取方法确定各个区域焊接工艺参数。焊接过程中,峰值电流、基值电流、焊接速度、送丝速度和脉冲频率在这 14 个工艺分区间按照一定规律进行变换,占空比为 50%,其余各区域工艺参数见表 5。

表 5 第 3 层第 2 道各区域焊接工艺参数

Table 5 Welding parameter of 3 layer and 2 pass

焊接工艺 区域范围	峰值 电流 I_p/A	基值电 流 I_b/A	频率 f/Hz	送丝速度 $v_f/$ ($cm \cdot min^{-1}$)	焊接速度 $v_w/$ ($cm \cdot min^{-1}$)
0° ~ 17°	200	100	2.2	90	16
17° ~ 37°	210	105	2.2	100	16
37° ~ 58°	215	107	1.9	110	14
58° ~ 122°	220	110	1.7	115	12
122° ~ 143°	230	115	1.4	120	10
143° ~ 163°	240	120	1.25	130	9
163° ~ 180°	250	125	1.1	140	8
180° ~ 197°	240	120	1.1	140	8
197° ~ 217°	230	115	1.25	130	9
217° ~ 238°	220	110	1.4	120	10
238° ~ 302°	210	105	1.7	115	12
302° ~ 323°	205	102	1.9	110	14
323° ~ 353°	200	100	2.2	100	16
353° ~ 360°	190	95	2.2	90	16

焊接过程稳定,送入的焊丝均匀熔化并过渡到熔池中,得到的 J 形坡口内焊缝外观图见图 6,焊缝鱼鳞纹间距均匀、成形均匀美观。第三层预先规划

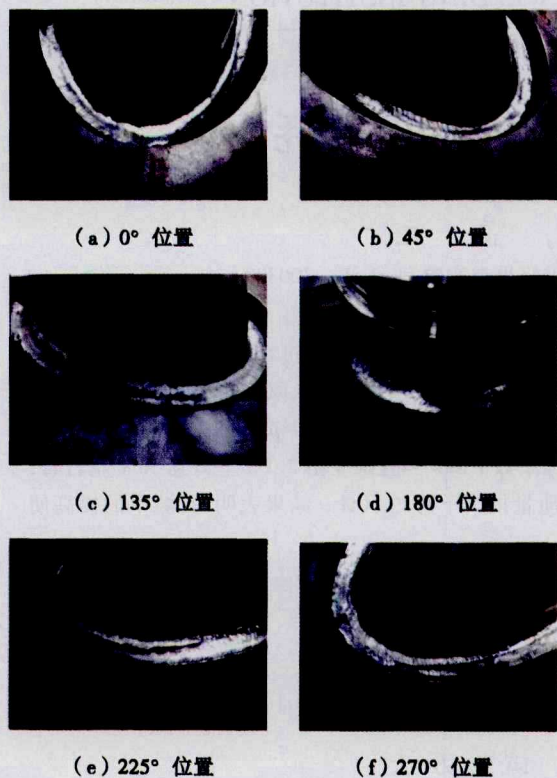


图6 J形坡口内第3层第2道的焊缝形貌
Fig. 6 Weld appearance of 3 layer and 2 pass

填充两道焊缝,由图6可知,两道焊缝可使该层J形坡口填满且填充表面与模拟件上表面基本平行,表明通过文中试验方法确定的焊接工艺参数能够满足J形坡口的填充要求。

5 结 论

(1) 不同位置J形坡口尺寸形状不同,焊前要根据当前位置坡口尺寸进行焊接轨迹规划,确定相应的多层焊道数及层数。

(2) 对于圆管与球面相贯的J形坡口,可以通过确定填充金属熔化面积、焊缝熔宽与焊接工艺参数之间的关系来设定焊接工艺参数,控制焊缝成形。

(3) 由于圆管与球面相贯J形坡口焊道形状复杂,每道焊缝可采用分区设置不同焊接工艺参数的方法以获得满意的焊接质量。

参考文献:

- [1] 赵建仓,朱平,李海清. 核电大型构件关键焊接技术[J]. 金属加工, 2012(12): 18-22.
Zhao Jiancang, Zhu Ping, Li Haiqing. Nuclear power large components critical welding technology[J]. MW Metal Forming, 2012(12): 18-22.
- [2] Changliang Chen, Shengsun Hu, Donglin He, *et al.* An approach to the path planning of tube-sphere intersection welds with the robot dedicated to J-groove joints[J]. Robotics and Computer - integrated Manufacturing, 2013, 29(4): 41-48.
- [3] 赵洁,胡绳荪,申俊琦,等. 基于MATLAB的球管相贯空间曲线焊缝的数学模型[J]. 焊接学报, 2011, 32(8): 89-92.
Zhao Jie, Hu Shengsun, Shen Junqi, *et al.* Mathematical model based on MATLAB for intersection seam of sphere and tube[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(8): 89-92.
- [4] 毛征宇,刘中坚. 一种三次均匀B样条曲线的轨迹规划方法[J]. 中国机械工程, 2010, 21(21): 2569-2577.
Mao Zhengyu, Liu Zhongjian. A trajectory planning method for cubic uniform B-spline curve[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(21): 2569-2577.
- [5] 段铁群,石广远,于丹,等. 重型压力容器马鞍形焊缝自动焊机插补算法与仿真[J]. 焊接学报, 2010, 31(1): 63-66.
Duan Tiequn, Shi Guangyuan, Yu Dan, *et al.* Interpolation algorithm and simulation of auto-welding saddle-shaped nozzle of heavy pressure vessels[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(1): 63-66.
- [6] 张光云. TIG熔焊成型中焊缝几何尺寸的建模与控制[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- [7] 于秀萍,孙华,赵希人,等. 基于人工神经网络的焊缝宽度预测[J]. 焊接学报, 2005, 26(5): 17-19.
Yu Xiuping, Sun Hua, Zhao Xiren, *et al.* Weld width predication based on artificial neural networks[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(5): 17-19.

作者简介: 姜丽艳,女,1988年出生,硕士,讲师. 主要从事焊接工艺和电弧物理方面的科研和教学工作. 发表论文5篇. Email: louly88@126.com

通讯作者: 李桓,男,教授. Email: lihuan@tju.edu.cn