

## 数字焊机埋弧焊接工艺参数优化

李 慧, 唐子金, 曾德胜

(中石化石油机械股份有限公司 沙市钢管分公司, 湖北 荆州 434001)

**摘 要:** 为适应智能化制造的发展趋势, 提高对数字焊机的焊接性能研究水平, 建立了数字焊管线钢埋弧焊工艺参数数学模型并验证分析。结果表明, 当焊缝面能量  $100 \text{ J/mm}^2 < Q \leq 220 \text{ J/mm}^2$ 、内外焊焊缝重合量  $1.5 \text{ mm} \leq e \leq 3.0 \text{ mm}$ 、焊缝余高  $0.5 \text{ mm} \leq \delta \leq 2.5 \text{ mm}$  时, 数学模型的计算结果与实际生产情况相符合。此外, 根据数学模型规范计算热输入量  $Q$ , 并与标准要求进行对比, 冲击试验后发现, 即使焊接过程中的热输入量较大, 焊缝冲击功仍符合标准要求, 焊缝的冲击韧性较好。该方法在提高工艺设计效率的同时降低了生产成本, 并保证了钢管的生产质量, 为数字化焊机在钢管焊接过程中的工艺参数优化提供参考。

**关键词:** 数字焊机; 埋弧焊; 焊缝坡口; 冲击功

中图分类号: TG457.6

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.03.008

### Parameter Optimization of Digital Welding Machine on Submerged Arc Welding Process

LI Hui, TANG Zijin, ZENG Desheng

(Shashi Steel Pipe Branch Company, Sinopec Petroleum Machinery Co., Ltd., Jingzhou 434001, Hubei, China)

**Abstract:** In order to adapt to the development trend of intelligent manufacturing and improve the research level of welding performance of digital welding machine, a method of establishing and optimizing the process parameter model of digital welding machine on SAW (Submerged Arc automatic Welding) steel pipe is introduced, and the mathematical model in the actual production process is verified. The results show that when the weld surface energy is  $100 \text{ J/mm}^2 < Q \leq 220 \text{ J/mm}^2$ , the overlap of internal and external welds is  $1.5 \text{ mm} \leq e \leq 3.0 \text{ mm}$  and the weld reinforcement is  $0.5 \text{ mm} \leq \delta \leq 2.5 \text{ mm}$ , the calculation result of the mathematical model is consistent with the actual production situation. In addition, the heat input  $Q$  is calculated according to the mathematical model specification and compared with the standard requirements. After the impact test, it is found that even if the heat input during the welding process is large, the impact energy of the weld is not high, and the impact toughness of the weld is good. This method not only improves the efficiency of process design, but also reduces the production cost, and ensures the production quality of steel pipe. It provides a reference for the optimization of process parameters of digital welding machine in the process of steel pipe welding.

**Key words:** digital welding machine; submerged arc welding; weld groove; impact energy

## 0 前 言

本世纪初, 日本松下公司率先推出了数字焊机, 焊接行业由此进入到全新的数字化时代<sup>[1]</sup>。随后关于数字焊机的研究一直在进行, 秦克礼等针对我国制管行业现状, 提出建设数字化智能焊管生产线并提供了相应的解决措施<sup>[2]</sup>。韩

保材等<sup>[3]</sup>对直缝埋弧焊管生产线焊接工艺及设备进行了论述, 研究表明, 采用数字电源可节能20%左右, 且数字电源适用于焊接复杂材质、大壁厚钢管。近年来, 中石化集团所属钢管公司对埋弧焊数字焊机现场应用及其配套控制改造进行了研究<sup>[4]</sup>。尽管国内油气输送管方面的研究一直在不断进步和发展<sup>[5-6]</sup>, 但关于采用数字焊机焊

接油气输送管的研究仍旧较少,随着油气输送管生产效率的不断提升,数字焊机在油气输送管的生产中逐渐得到应用。全数字焊机具有调节和采集焊接参数方便、焊缝形貌质量高、人力成本低、能耗低等优点,其推广应用将为实现智能化制造工厂提供有力保障<sup>[7-9]</sup>。目前埋弧焊机行业通常采用数字化焊机,数字焊机是在传统模拟焊机的基础上增加一些数字化控制的元器件和系统<sup>[10-11]</sup>,从而提高模拟焊机参数精度;但受到模拟焊机本身器件和控制器件的性能影响,焊接质量提高效果不明显。相比较而言,数字焊机是全新设计的新型数字智能埋弧焊机,其结构稳定、寿命长、采用微处理器进行控制,只需修改软件便可增加新的功能,不需要增加逻辑电路。数字焊机代表了埋弧焊机行业的未来发展方向。

目前国内专利和文献所描述的数字焊机均通过在原有焊机的基础上加一些控制电路系统以表明其先进性<sup>[12-13]</sup>,而目前市场上有能力生产和销售数字焊机的均为国外大型企业(如日本松下公司、德国西马克公司和美国林肯公司等),但這些企业的设备硬件和软件都是不公开的,从而导致其原理和扩展性能不明确,价格和维护也较贵。为顺应智能制造的发展趋势,提高对数字焊

机焊接性能的研究水平,需要对数字焊机的焊接性能进行试验和研究。本研究重点介绍数字焊管线钢埋弧焊工艺的数学模型建立及其工艺参数优化方案,并以中石化集团所属钢管公司的实际生产为例验证该数学模型,从而优化设计出数字焊机埋弧自动焊焊接规范以及焊接工艺参数。

## 1 数学模型建立

### 1.1 模型概述

本数学模型首先通过焊接电流、电压、焊接速率等工艺参数并结合钢管本身厚度等参数计算焊接工艺中焊缝面能量 $Q$ ,在焊缝面能量满足条件的情况下,通过焊接坡口、工艺参数及焊接试验数据等计算焊缝重合量 $e$ 及焊缝余高 $\delta$ ,同时结合焊缝面能量、焊缝重合量及焊缝余高的取值范围进行综合分析,建立埋弧焊工艺规范数学模型<sup>[14]</sup>,其中焊缝面能量的取值范围为 $100 \text{ J/mm}^2 < Q \leq 220 \text{ J/mm}^2$ ,内外焊缝重合量的取值范围为 $1.5 \text{ mm} \leq e \leq 3.0 \text{ mm}$ ,焊缝余高的取值范围为 $0.5 \text{ mm} \leq \delta \leq 2.5 \text{ mm}$ 。通过建立数学模型,对管线钢埋弧焊工艺参数进行优化设计,得出数字焊机埋弧自动焊工艺参数。管线钢埋弧焊工艺规范数学模型建立过程如图1所示。

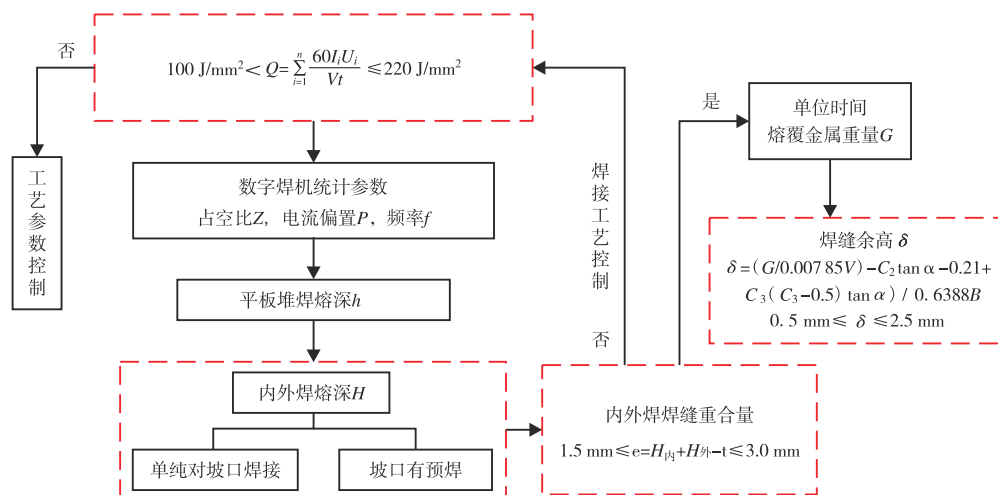


图1 管线钢埋弧焊工艺规范数学模型建立过程

根据模拟焊机钢管生产所积累的实际经验和总结,根据最终焊缝形貌和质量,焊接工艺参数主要包括焊接面能量、焊缝重合量、焊缝余高3组参数。

#### 1.1.1 焊接面能量计算

焊接面能量 $Q$ 的计算见公式(1),当焊接面能量 $Q$ 为 $100 \sim 220 \text{ J/mm}^2$ ,才可进行其他参数的计算,否则需要调整焊接工艺参数。

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{60I_i U_i}{vt} \quad (1)$$

式中:  $Q$ ——焊接面能量,  $\text{J}/\text{mm}^2$ ;

$I$ ——外焊焊接电流,  $\text{A}$ ;

$U$ ——外焊电弧电压,  $\text{V}$ ;

$v$ ——焊接速度,  $\text{mm}/\text{min}$ ;

$t$ ——钢管壁厚,  $\text{mm}$ ;

$n$ ——焊枪电极总数;

$i$ ——焊枪电极序号,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

### 1.1.2 焊缝重合量的计算

焊缝重合量  $e$  的计算见公式 (2), 其中内外焊缝熔深  $H_{\text{外}}$  与平板熔深  $h$  和坡口工艺有关, 平板熔深  $h$  需要经过试验确定, 坡口尺寸如图2所示,  $h_1$  表示内焊熔深,  $h_2$  表示外焊熔深,  $C_1$  为内焊坡口深度,  $C_2$  为外焊坡口深度,  $d_1$  为内焊焊丝直径,  $d_2$  为外焊焊丝直径,  $B_1$  为内焊坡口宽度,  $B_2$  为外焊坡口宽度,  $\alpha_1$  为内焊坡口角度,  $\alpha_2$  为外焊坡口角度,  $C_3$  为预焊坡口高度,  $t$  为壁厚。

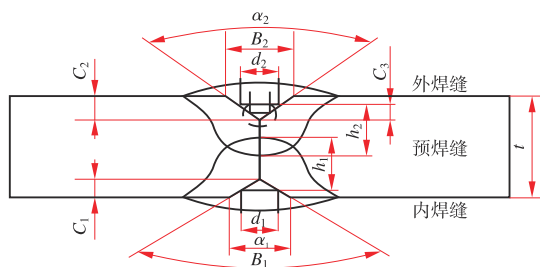


图2 焊接坡口参数表

$$e = H_{\text{内}} + H_{\text{外}} - t \quad (2)$$

式中:  $H_{\text{内}}$ ——内焊缝熔深,  $\text{mm}$ ;

$H_{\text{外}}$ ——外焊缝熔深,  $\text{mm}$ ;

$t$ ——管体壁厚,  $t$  的取值范围为  $6 \leq t \leq 40$ ,  $\text{mm}$ 。

### 1.1.3 焊缝余高的计算

余高  $\delta$  的计算公式为

$$\delta = (G/(\rho v) - S_1 - S_2 + A)/(kB) \quad (3)$$

式中:  $\delta$ ——焊缝余高,  $\text{mm}$ ;

$G$ ——焊缝单位时间熔敷金属量,  $\text{g}/\text{min}$ ;

$v$ ——焊接速度,  $\text{mm}/\text{min}$ ;

$k$ 、 $A$ ——直线公式系数;

$S_1$ ——坡口面积,  $\text{mm}^2$ ;

$S_2$ ——预焊面积,  $\text{mm}^2$ ;

$B$ ——焊缝宽度,  $\text{mm}$ 。

### 1.2 熔深的优化

在原有模拟焊接的基础上进行优化<sup>[15]</sup>, 得到熔深  $h$  的计算公式。按照正交试验原理, 在  $\Phi 1\ 016\ \text{mm} \times 17.5\ \text{mm}$  L485M 直缝钢管上验证不同的工艺参数, 合计 122 组, 选取部分具有代表性的试验, 其焊接试验参数见表1, 焊后取酸洗样观察焊接接头的宏观形貌, 与采用传统焊接方式焊接成形的焊接接头形貌进行对比, 结果如图3所示, 在  $-20\ ^\circ\text{C}$  条件下对焊缝位置进行冲击性能测试, 结果如图4所示。

表1 数字焊机试验参数

试样编号	焊速/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	电流/ $\text{A}$	电压/ $\text{V}$	占空比	偏置	频率/ $\text{Hz}$	相位角/( $^\circ$ )	熔深/ $\text{mm}$	余高/ $\text{mm}$
2 <sup>#</sup>	1.2	1 100/800	36/42	50%	25%	20	0/90	11.0	4.5
5 <sup>#</sup>	1.2	1 100/800	36/42	50%	25%	60	0/90	11.0	4.7
14 <sup>#</sup>	1.2	1 100/800	36/42	50%	0%	60	0/90	11.2	4.4
41 <sup>#</sup>	1.6	850/650/500	36/38/40	50%	0%	60	0/90/180	7.6	3.3
68 <sup>#</sup>	1.6	1 010/750/650/550	35/38/38/40	50%	0%	60	0/90/180/270	9.5	3.2
77 <sup>#</sup>	1.6	1 010/750/650/550	35/38/38/40	50%	-25%	60	0/90/180/270	9.3	3.6
95 <sup>#</sup>	0.8	800	38	50%	0%	60	0	8.1	3.2
108 <sup>#</sup>	0.8	800	38	75%	-25%	100	0	7.0	3.4

焊缝冲击功在  $-20\ ^\circ\text{C}$  时 3 次实测值和平均值如图4所示。图3和图4表明, 采用传统焊接方式焊接成形的焊接接头熔深在同等条件下更小, 且焊缝冲击功约为 100 J, 而采用数字焊机的焊接接头熔深更大, 且采用 1、2、3、4 丝 (95<sup>#</sup>、14<sup>#</sup>、41<sup>#</sup>、68<sup>#</sup> 试样), 其焊缝韧

性均值在 140 J 以上; 采用最为常见的 3~4 丝, 焊缝韧性更高, 达 170 J 以上, 远高于传统焊接方式。因此, 采用数字焊机焊接可获得优异的焊接接头韧性。

根据上述试验, 进行线性回归分析, 得出平板埋弧自动焊的熔深  $h$  计算公式

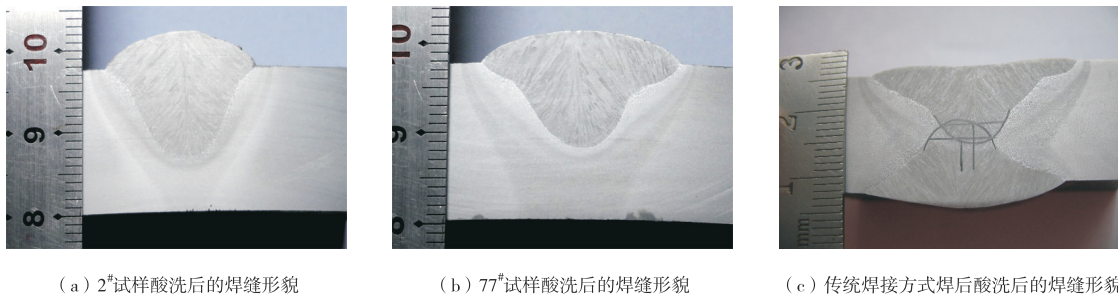


图3 试样焊缝酸洗后宏观形貌

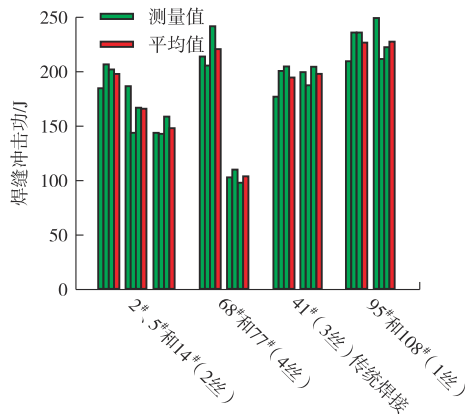


图4 -20 °C在不同焊接工艺下焊缝冲击功

$$h = \exp(-0.3 + 1.075 \ln I - 0.412 \ln U - 0.48 \ln v - 0.04 \ln P + 0.57 (\ln P)^2 - 0.084 \ln Z) \quad (4)$$

式中： $h$ ——平板熔深，mm；

$I$ ——焊接电流，A；

$U$ ——电弧电压，V；

$v$ ——焊接速度，mm/min；

$P$ ——电流偏置，取值范围为0.75 ~ 1.25；

$Z$ ——占空比，取值范围为0.5 ~ 1.5；

$F$ ——常用频率，取值范围为50 ~ 60 Hz。

焊接坡口时，焊缝熔深计算公式如下

$$H_1 = h_1 + C_1 - \text{if}(C_1 > d_1 / (2 \tan \alpha_1), d_1 / (2 \tan \alpha_1), C_1) \quad (5)$$

式中： $H_1$ ——焊缝熔深，mm；

$h_1$ ——平板熔深，mm；

$C_1$ ——焊缝坡口高度，mm；

$\alpha_1$ ——焊缝坡口角度，(°)；

$d_1$ ——焊缝一丝焊丝直径，mm；

$\text{if}$ ——excel中的数学函数。

当坡口需要先预焊再进行焊接时，焊缝熔深可根据公式(6)计算得出

$$H_2 = h_2 + C_2 - \text{if}(C_3 > d_2 / (2 \tan \alpha_2), C_3, d_2 / (2 \tan \alpha_2)) \quad (6)$$

式中参数含义与公式(5)相同，只是数学函数不同，且公式(6)中的符号所表示的参数与图2中的坡口参数相对应。

根据实际工况，内外焊重合量 $e$ 的取值范围为1.5 ~ 3.0 mm；当计算结果不满足要求时，需要调整焊接工艺参数，重新进行焊接面能量和焊缝重合量的计算。

### 1.3 焊缝余高的优化

传统表面圆冠形焊缝面积 $S$ 的计算公式为

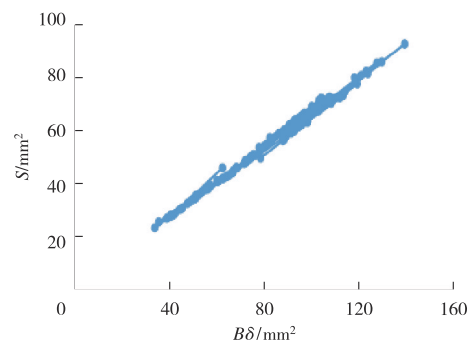
$$S = 2/3 B \delta \quad (7)$$

式中： $S$ ——焊缝面积，mm<sup>2</sup>；

$B$ ——焊缝宽度，mm；

$\delta$ ——焊缝余高，mm。

由公式(7)可知， $B$ 与 $\delta$ 的乘积与表面积 $S$ 成正比。为进一步验证公式(7)的适用性，进行现场试验，记录试验数据共计122组，所有试验数据经拟合后如图5所示。

图5 所有数据拟合后的 $S$ - $B\delta$ 曲线

根据图5，经过回归分析得到实际焊缝面积 $S$ 的计算方法为

$$S = 0.21 + 0.6388 B \delta \quad (8)$$

根据公式(8)可以得到直缝圆冠形焊缝余高 $\delta$ 的计算方法为



$$\delta = (G/(0.00785v) - C^2 \tan \alpha - 0.21 + C_3(C_3 - 0.5) \tan \alpha)/(0.6388B) \quad (9)$$

式中:  $\delta$ ——焊缝余高, mm;

$G$ ——焊缝单位时间熔敷金属量, g/min;

$v$ ——焊接速度, mm/min;

$C$ ——焊缝坡口深度, mm;

$C_3$ ——预焊高度, mm, 当无预焊时  $C_3=0$ ;

$A$ ——焊接坡口角度, ( $^\circ$ );

$B$ ——焊缝宽度, mm。

在理论计算时, 焊缝宽度  $B=11.42+0.654t$ , 在进行实测时, 代入焊缝宽度实测值能计算局部余高。

单位时间熔敷金属重量  $G$  计算方法如下:

$$G_i = \exp(11.198 + 3.529 \ln I - 0.146(\ln I)^2 - 0.117 \ln U + 0.163 \ln P - 0.478(\ln P)^2 + 0.183 \ln Z + 0.602 \ln K - 0.021 \ln F) \quad (10)$$

式中:  $K$ ——多丝焊系数,  $K=(1+if(i>1, I_i/I_1, 0))$ ,

$i=1, 2, \dots, n$ ,  $I_i$  表示第  $i$  丝的电流。

当  $0.5 \text{ mm} \leq \delta \leq 2.0 \text{ mm}$  时, 对应的焊接工艺符合要求。根据计算的这 3 个参数, 综合分析这些参数的取值范围, 优化设计出数字焊机埋弧自动焊焊接规范以及焊接工艺参数。但在实际生产过程中, 管体加工成形涉及多个岗位, 从铣边、预弯、成型、预焊、预焊精整, 这些岗

位的操作工艺都对内外焊的焊缝形貌和内在质量有明显的影响。因此, 在理论计算时, 需要对各个岗位的参数进行简化, 纳入到具体的公式中进行计算, 从而建立数学模型。

## 2 数学模型验证

建立了数学模型并计算获取相关试验参数后, 通过生产实践案例对建立的数学模型进行验证, 进一步证明该模型在焊接工艺优化方面的可行性。设备采用林肯 AC/DC 1000SD 数字焊机及配套设备, 前丝采用直流, 后丝采用交流方波<sup>[9]</sup>, 交流间采用  $90^\circ$  相位角。

采用  $\Phi 1016 \text{ mm} \times 30.4 \text{ mm}$  L485M 直缝钢管和  $\Phi 610 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$  L450M 直缝钢管进行试验验证。 $\Phi 1016 \text{ mm} \times 30.4 \text{ mm}$  钢管先进行预焊, 预焊高度为  $6.0 \text{ mm}$ , 再分别进行 1 道次内 4 丝埋弧焊和 1 道次外 4 丝埋弧焊, 焊速均为  $1.10 \text{ m/min}$ , 焊丝直径均为  $4 \text{ mm}$ , 钝边为  $9.5 \text{ mm}$ ;  $\Phi 610 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$  钢管分别通过 1 道次内 3 丝埋弧焊、1 道次外 3 丝埋弧焊进行焊接, 焊速均为  $1.50 \text{ m/min}$ , 焊丝直径均为  $3 \text{ mm}$ , 钝边为  $4.0 \text{ mm}$ 。焊接所用占空比和电流偏置均为 1, 频率为  $120 \sim 200 \text{ Hz}$ 。内焊和外焊采用的焊接工艺以及焊接坡口参数见表 3。

表 3 内外焊焊接电流/电压及焊接坡口高度/角度表

钢管规格/(mm×mm)	焊丝	内焊		外焊		坡口高度/mm		坡口角度/( $^\circ$ )	
		电流/A	电压/V	电流/A	电压/V	外坡口	内坡口	外坡口	内坡口
$\Phi 1016 \times 30.4$	1 <sup>#</sup>	1 050	36	1 100	36	11.5	9.4	34	34
	2 <sup>#</sup>	750	38	750	38				
	3 <sup>#</sup>	650	40	650	40				
	4 <sup>#</sup>	550	42	550	42				
$\Phi 610 \times 9$	1 <sup>#</sup>	550	37	780	37	3.5	3.5	34	34
	2 <sup>#</sup>	520	39	450	39				
	3 <sup>#</sup>	39	41	400	41				

以  $\Phi 1016 \text{ mm} \times 30.4 \text{ mm}$  管线钢为例进行计算, 首先计算外焊的焊接面能量  $Q$ , 将对应数据带入公式 (1), 得到  $Q=210 \text{ J/mm}^2$ ,  $Q<220 \text{ J/mm}^2$ , 满足规范要求, 其值属于适用数值。

其次计算焊缝重合量  $e$ , 先计算内外焊熔深  $H_1$  和  $H_2$ ; 将表 3 及文中的相关数据代入公式 (5)、

公式 (6) 分别计算得到, 内焊熔深  $H_1=16.8 \text{ mm}$ , 外焊熔深  $H_2=16.4 \text{ mm}$ 。焊缝重合量  $e=2.8 \text{ mm}$ , 而根据规范要求, 焊缝重合量的取值范围为  $1.5 \text{ mm} \leq e \leq 3.0 \text{ mm}$ , 因此,  $e$  也属于适用数值。

最后计算焊缝余高  $\delta$ , 先计算焊缝单位时间焊丝熔敷量  $G$ , 将表 3 及文中的相关数据代

入公式(10)分别计算得内焊 $G_1=940.58$  g/min, 外焊 $G_2=957.38$  g/min。再根据公式(9)计算内、外焊余高,可以得出内焊余高 $\delta_1=2.7$  mm, 外焊

余高 $\delta_2=1.9$  mm, 均在0.5~2.5 mm内, 因此, 焊缝余高 $\delta$ 属于适用数值。管体焊缝参数对比详见表4。

表4 两种钢管的焊缝参数表

钢管规格/ (mm×mm)	焊接面能量 $Q/(J\cdot mm^{-2})$	焊缝重合量 $e/mm$		焊缝余高 $\delta/mm$			
		计算值	实际值	内焊计算值	内焊实测值	外焊计算值	外焊实测值
$\Phi 1\ 016\times 30.4$	210	2.8	3.6	2.7	2.8	1.9	1.9
$\Phi 610\times 9$	279	2.4	1.9	2.7	2.2	2.6	2.2

在埋弧焊管焊接过程中,往往存在内外焊道焊偏量,当焊偏量过大时,使得内外焊的熔合区减小,严重时会造成层间未焊透及未熔合等缺陷<sup>[16]</sup>。因此在进行厚壁管线钢焊接时,为避免焊偏量的急剧减小,需要增大重合量,常采取的措施为增加1°焊丝电流,增加热输入。在此种措施下 $\Phi 1\ 016$  mm×30.4 mm钢管实际焊缝重合量偏大,而 $\Phi 610$  mm×9 mm L450M薄壁钢管焊缝重合量实际值低于计算值,为了减少焊缝咬边,需要持续优化焊接工艺。通常情况下熔池温度与热输入成正比,热输入越小,熔池温度降低越快,熔池表面张力越大。表面张力阻止熔池金属在电弧力作

用下的流动,表面张力越大,熔池中液态金属的流动范围越小,容易产生窄而高的焊缝<sup>[17]</sup>。

为检验焊后试样冲击性能,冲击试验根据API SPEC 5L标准进行,采用标准全尺寸试样,长度 $L$ 为55 mm,宽度为10 mm,厚度为10 mm,在 $L/2$ 处开口,缺口半径为0.25 mm,与水平夹角为 $67.5^\circ$ ,分别在焊缝中心和热影响区制取试样,测得钢管焊缝冲击试验结果见表5,通过与标准要求进行对比,即使在较大的热输入下,焊缝冲击功都符合标准要求。对于螺旋钢管,由于采用下坡焊位置,熔深减少,宽度增加,公式(4)和公式(8)均不适用,需要另行现场试验研究。

表5 钢管焊缝冲击韧性试验结果

钢管规格/ (mm×mm)	焊接面能量 $Q/$ ( $J\cdot mm^{-2}$ )	试验温度/ $^\circ C$	焊缝冲击功 $J$		热影响区冲击功 $J$	
			单值	均值	单值	均值
$\Phi 1\ 016\times 30.4$	210	-20	158、151、138	149	229、242、237	236
$\Phi 610\times 9$	279	-10	107、101、114	107	187、207、194	196
标准要求			单值 $\geq 60$ , 平均值 $\geq 80$			

综合分析焊缝面能量 $Q$ 、内外焊焊缝重合量 $e$ 、焊缝余高 $\delta$ 的取值范围,并通过现场试验对模型进行了验证,结果发现该数学模型计算结果与实际生产情况相符合,从而优化设计出数字焊机埋弧自动焊焊接规范以及焊接工艺参数,进而提高钢管质量,降低生产成本,提高生产效率,为数字化焊机钢管埋弧焊工艺参数的优化提供参考。

### 3 结 论

(1) 通过建立数学模型,计算焊缝面能量 $Q$ 、焊缝重合量 $\delta$ 及焊缝余高 $e$ ,并与实际计算值进行对比验证,提出适用于数字焊机埋弧自

动焊的数学模型规范:  $100\ J/mm^2 < Q \leq 220\ J/mm^2$ 、 $0.5\ mm \leq \delta \leq 2.5\ mm$  以及  $1.5\ mm \leq e \leq 3.0\ mm$ 。

(2) 根据数学模型优化焊接工艺,建立了数字焊机埋弧自动焊焊接工艺规范,焊接接头冲击试验表明,采用建立的数学模型计算热输入量,并与标准要求进行对比,发现即使热输入量较大,管体的冲击功仍符合标准要求,钢管冲击韧性较高,从而提高了钢管质量和生产效率。

(3) 通过数字焊机生产 $\Phi 1\ 016$  mm×30.4 mm L485M钢管和 $\Phi 610$  mm×9 mm L450M钢管,并对建立的工艺参数模型进行了验证,数学模型计算结果与实际生产基本符合。

(下转第52页)