

DP780 熔化极气体保护焊工艺参数优化

卢振洋, 汤超, 熊威, 黄鹏飞

(北京工业大学 焊接研究所, 北京 100124)

摘 要: 以 2 mm 板厚无涂层 DP780 为研究对象, 运用正交试验方法优化其熔化极气体保护焊工艺参数。主要研究了送丝速度、焊接速度、电弧电压、焊丝伸出长度、焊接倾角 5 个因素对 DP780 搭接接头抗拉强度的影响规律。根据正交试验的极差和方差分析, 找到了影响接头抗拉强度的主要因子为送丝速度和焊接速度, 其它因子对接头强度影响不显著; 基于多元回归分析, 拟合了近似曲线, 得到了控制接头抗拉强度的近似数学模型, 揭示了主要工艺参数对接头抗拉强度的影响规律。

关键词: 先进高强钢; 熔化极气体保护焊; 工艺参数优化

中图分类号: TG441.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)12-0009-04



卢振洋

0 序 言

能源危机和环境问题的加剧, 使得汽车用钢日趋高强度, 以期降低车重, 减少油耗^[1]。先进高强钢以其高强度和良好的延展性成为车身的理想材料^[2], 其中双相钢是目前最普遍使用的先进高强钢钢种之一。

先进高强钢具有较高的碳当量, 焊接过程中在焊接热循环的作用下母材微观组织的变化极大的改变了接头的力学性能, 同时不同钢材供应商生产的钢材的化学成分和冶金工艺大不相同, 这些给先进高强钢的焊接带来了许多挑战。先进高强钢电弧焊搭接接头在汽车制造中具有广泛应用, 其工艺参数的优化^[3-5]及接头性能的研究对先进高强钢弧焊技术的应用具有重要的工程应用价值, 也是国际上研究的前沿课题, 对此国内还没有深入系统的研究。文中以 2.0 mm 板厚 DP780 钢为研究对象, 通过正交试验研究了熔化极气体保护焊的主要工艺参数对接头强度的影响规律, 为先进高强钢焊接参数的优选提供了理论和试验依据。

1 试验方法

文中采用 DP780 钢材, 由宝山钢铁公司提供。DP780 的化学成分和力学性能如表 1 和表 2 所示。

表 1 DP780 钢化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of DP780 steel

C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
0.094	0.14	1.99	0.005 6	0.002 3	0.036	余量

表 2 DP780 钢力学性能

Table 2 Mechanical properties of DP780 steel

屈服强度 $R_{eL0.2}$ / MPa	抗拉强度 R_m / MPa	断后伸长率 $A_{80\text{ mm}}$ (%)
500 ~ 650	≥780	≥10

焊接试验两板重叠部分为 25 mm, 焊接方法为熔化极气体保护焊, 保护气体为 80% Ar + 20% CO₂, 填充金属为 ER70S-6。文中选取了对焊接热输入有直接影响的参数: 送丝速度、焊接速度、电弧电压以及对焊缝成形有直接关系的参数包括焊枪倾角和焊丝伸出长度, 其余参数恒定不变, 每个参数选取 5 个水平以便在较大范围内优化工艺参数。通过预备性试验确定因素水平表, 如表 3 所示。

表 3 试验因素及水平

Table 3 Experimental factors and levels

送丝速度	焊接速度	电弧电压	焊丝伸出长度	倾角	
$v_s / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$v / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	U / V	D / mm	$E / (^\circ)$	
1	3.0	1.0	17.0	10	65
2	3.6	1.1	17.5	12	75
3	4.2	1.2	18.0	14	90
4	4.8	1.3	18.5	16	105
5	5.4	1.4	19.0	18	115

收稿日期: 2012-09-07

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2009ZX04014-072); 国家自然科学基金资助项目(51075011)

2 试验结果及分析

2.1 直观分析

表 4 给出了根据正交试验设计得到的不同因素

及水平搭配下对应的接头抗拉强度的结果。其中, k_n ($n = 1 \sim 5$) 分别为因素 A、B、C、D、E 的第 n 水平所在的试验中对应的抗拉强度的均值。极差 R 代表 k_n ($n = 1 \sim 5$) 中的最大值与最小值之差。

比较表 4 中各列的 k 值, 送丝速度在 3.0 ~ 5.4

表 4 正交试验表(部分)
Table 4 Orthogonal test table

试验编号	因素 A	因素 B	A × B	A × B	A × B	A × B	因素 C	因素 D	因素 E	误差列	误差列	抗拉强度 R_m /MPa
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	576.4
2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	568.9
3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	493.9
4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	519.4
5	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	518.6
...
45	4	5	3	4	3	5	1	4	1	2	2	594.3
46	5	1	5	2	5	2	3	4	4	3	1	600.5
47	5	2	1	3	1	3	4	5	5	4	2	612.6
48	5	3	2	4	2	4	5	1	1	5	3	620.9
49	5	4	3	5	3	5	1	2	2	1	4	616.0
50	5	5	4	1	4	1	2	3	3	2	5	602.6
k_1	537.0	599.57	576.04	580.54	576.42	591.13	585.96	577.03	579.33			
k_2	565.7	584.66	585.95	572.56	582.41	572.18	572.67	586.52	574.17			
k_3	576.0	572.13	570.19	572.28	574.49	570.49	573.54	567.82	581.31			
k_4	579.1	571.17	582.80	581.37	570.10	576.08	569.28	580.41	577.19			
k_5	606.9	561.81	568.36	576.59	579.60	567.46	581.89	571.56	579.34			
R	69.9	37.76	17.59	9.09	12.31	23.67	16.68	18.70	10.98			

注: A × B 代表送丝速度和焊接速度交互作用

m/min 变化时, 随着送丝速度的提高, 接头的抗拉强度增大; 焊接速度在 1.0 ~ 1.4 m/min 变化时, 随焊接速度的提高, 接头抗拉强度减小; 焊丝伸出长度和焊接倾角分别在 k_2 和 k_3 水平下接头抗拉强度达最大值。

极差 R 的大小代表因素对指标影响的主次。由表 4 中的数据结果可以看出, 该试验中对接头抗拉强度影响的主次顺序依次为送丝速度、焊接速度、送丝速度和焊接速度的交互作用、焊丝伸出长度、电弧电压、焊接倾角。

确定优化方案。由表 4 的计算结果可知, 当送丝速度为 5.4 m/min, 焊接速度为 1.0 m/min, 电弧电压为 17 V, 焊丝伸出长度为 1.2 mm, 焊接倾角为 90°时, 接头的抗拉强度均为最大值, 故为优化方案。由于该方案正交试验中并未出现, 故通过补充试验得到该方案在相同工艺下的抗拉强度为 640 MPa, 高于正交试验中数据, 证明该优化方案合理。

2.2 方差分析

表 5 给出了方差分析结果。其中, F' 为各因素的平均离差的平方和与误差的平均离差平方和的比

值, 反应了各因素对结果影响程度的大小。显著性水平取 0.1。 F 代表各效应项与误差项均方差的比值。从结果来看, 送丝速度和焊接速度的 F' 均大于临界值, 因此对抗拉强度影响显著, 而其它因素 F' 小于临界值, 因此影响不显著。

表 5 抗拉强度方差分析结果
Table 5 Results of variance analysis

因素	偏差平方和 ε	自由度 σ	比值 F'	临界值 F	显著性
A	29 960.05	4	14.192	2.81	显著
B	6 339.31	4	3.003	2.81	显著
A × B	9 031.33	16	1.29	2.39	不显著
C	1 939.61	4	0.919	2.81	不显著
D	2 155.74	4	1.021	2.81	不显著
E	713.74	4	0.338	2.81	不显著
误差	4 223.23	8			

2.3 回归分析

试验建立的多元线性回归模型为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \varepsilon, \\ \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

式中: $\beta_0 \sim \beta_5$ 都是未知的参数; $x_1 \sim x_5$ 分别代表因素 A、B、C、D、E 的独立试验. 利用最小二乘法估计这些参数. 在最小二乘法估计运算中运用矩阵的运算方法解正规方程组, 引入矩阵如下.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & x_{n4} & x_{n5} \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_n \end{bmatrix}$$

由此, 正规方程组可表示为 $X^T X \hat{\beta} = X^T Y$. $\hat{\beta}$ 为 β 的估计. 假定 X 为列满秩的, 即 $R(X) = 6$, 则 $R(X^T X) = R(X) = 6$, 故 $(X^T X)^{-1}$ 存在. 解正规方程组得 $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$, 则经验回归方程为 $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5$. 利用 MINITAB 软件对文中进行多元回归计算得到回归方程为 $y = 578 + 28.4x_1 - 67.0x_2 - 2.31x_3 - 0.85x_4 + 0.150x_5$, 这里用 P 值表征方程与因子的置信水平, P 值越小效果越显著. 方程的 P 值为 0, 该回归方程高度显著. 5 个因素的 P 值分别为 $P_1 = 0, P_2 = 0.003, P_3 = 0.584, P_4 = 0.419, P_5 = 0.354$. 在置信水平为 0.05 下, 仅因素 A、B 的回归系数是高度显著的. 把因素 C、D、E 去掉后, 再进行两元一次回归分析计算, 其回归方程为 $y = 538 + 28.4x_1 - 67.0x_2$, 回归方程的 P 值为 0, 所以回归方程为高度显著. 因素 A、B 的回归系数的 P 值分别为 0.002. 所以因素 A、B 的回归均为高度显著. R^2 代表方程与试验数据的拟合程度. 方差分析中输出结果中 $R^2 = 62.6\%$, R^2 (调整) = 61.0%, R^2 (预测) = 57.29%, Durbin-Watson 统计量为 2.185 42. R^2 值表明这些预测变量可以解释抗拉强度中 62.6% 的方差. 调整后的 R^2 为 61.0%, 这说明了模型中预测变量的个数. 这两个值都表明模型与数据拟合较好. 预测的 R^2 为 57.29%, 由于预测的 R^2 值与 R^2 以及调整的 R^2 值都很接近, 因此模型并没有过度拟合而且具有足够的预测能力. Durbin-Watson 统计量为 2.185 42, 表明残差不存在相关性.

根据回归方程知在较大的送丝速度和较小的焊接速度下能得到最大的抗拉强度. 图 1、图 2 给出了在不同送丝速度和焊接速度下的曲面和等值线.

从图 1 和图 2 可以看出, 送丝速度和焊接速度是该试验中影响接头抗拉强度最大的因素. 无论是用直观分析法、方差分析法, 还是多元线性回归法,

都能够充分说明这一点.

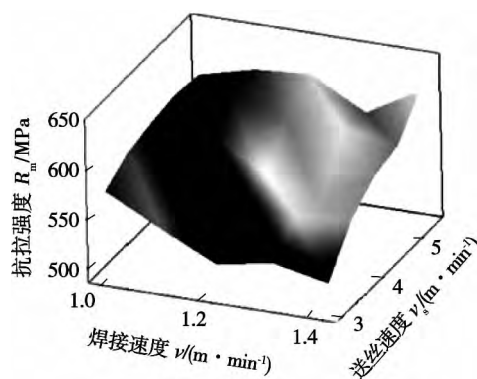


图 1 在各种送丝速度和焊接速度下抗拉强度的曲面
Fig. 1 Surface plot of tensile strength at various settings of wire feed rate and torch speed

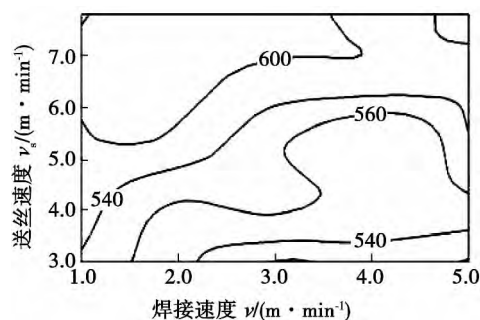


图 2 在各种送丝速度和焊接速度下抗拉强度的等值线 (MPa)
Fig. 2 Contour plot of tensile strength (TS) at various settings of wire feed rates and torch speeds

3 结 论

(1) 通过正交试验的直观分析得到了控制接头抗拉强度的优化方案, 即送丝速度为 5.4 m/min, 电弧速度为 1.0 m/min, 电弧电压为 17 V, 焊丝伸出长度为 1.2 mm, 焊接倾角为 90°.

(2) 方差分析结果表明送丝速度、焊接速度对接头抗拉强度影响为高度显著, 送丝速度与焊接速度的交互作用、电弧电压、焊丝伸出长度、焊接倾角的影响不显著.

(3) 利用多元线性回归分析得到了控制接头抗拉强度的近似数学模型, 由此可以进行接头抗拉强度的预测, 为工程实际中焊接结构设计提供参考.

(4) 较大的送丝速度和较小的焊接速度下能得到更大的抗拉强度. 大的送丝速度和小的的焊接速度会熔敷更多的填充金属, 同时有更大的熔深, 这些导致更大的抗拉强度.

参考文献:

- [1] 康永林. 汽车轻量化先进高强钢与节能减排[J]. 钢铁, 2008, 43(6): 1-8.
Kang Yonglin. Light weight vehicle, advanced high strength steel energy saving and emission reduction[J]. Iron and Steel, 2008, 43(6): 1-8.
- [2] Koganti R, Angotti S, Joaquin A, *et al.* Static tensile strength of gas metal arc welded (GMAW) joints of uncoated dual phase 600 (DP600) steels[C]// 2008 American Society of Mechanical Engineers International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Evanston, Illinois, 2008: 1-9.
- [3] 张本生, 周红, 于永利. 电弧喷涂粉末管状丝材的工艺参数优化[J]. 焊接学报, 2000, 21(4): 58-60.
Zhang Bensheng, Zhou Hong, Yu Yongli. Optimizing parameters of a new spraying material[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(4): 58-60.
- [4] 徐文立, 刘雪松, 方洪渊, 等. 薄板高强铝合金 LY12CZ 焊接工艺参数的优化[J]. 焊接学报, 2004, 25(2): 39-42.
Xu Wenli, Liu Xuesong, Fang Hongyuan, *et al.* Parameters optimization for welding aluminum alloy 2024 sheet with high strength[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(2): 39-42.
- [5] 刘双宇, 张宏, 刘凤德, 等. CO₂激光-MAG 电弧复合焊接工艺参数优化[J]. 焊接学报, 2011, 32(10): 61-64.
Liu Shuangyu, Zhang Hong, Liu Fengde, *et al.* Parameters optimization for CO₂ laser-MAG arc hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(10): 61-64.

作者简介: 卢振洋, 男, 1957 年出生, 博士, 教授. 主要从事材料加工工程领域的研究工作. 发表论文 50 多篇. Email: xwlxkf@163.com

书 讯

宋天虎副理事长、潘际銮院士及德国莱布尼兹大学 D. Rehfeldt 教授倾情作序



书号: 978-7-111-37325-4
定价: 49.00 元

《焊接电弧现象与焊接材料工艺性》

王 宝 宋永伦 著 林尚扬 审

本书以对焊接电弧现象的大量、细致的观察为切入点, 揭示熔滴过渡现象与工艺性之间的具体联系。

通过焊接质量分析仪提取反映某些工艺状态的电弧现象的数据信息, 用电弧物理指数加以描述, 从该类电弧过程的属性寻求有效的分析方法, 提出了对其特征现象及物理意义的定量认识和解读。

将对焊接材料工艺性的评价由人的直感和经验提升到信息化、知识化的层面上, 从而实现焊接材料分析与评价的量化。

编辑热线: 010-88379733 购书热线: 010-88379425 传真: 010-68351729 网络购书支持: 中国科技金书网

传真购书请注明: 姓名、详细地址、邮编、联系电话、传真、E-mail、所购图书书名、书号、数量、是否需要发票及发票抬头

MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

Detection of seam deviation of micro butt gap in laser welding of 304 austenitic stainless steel based on corner point method

GAO Xiangdong , HUANG Jianyuan , MO Ling (School of Electromechanical Engineering , Guangdong University of Technology , Guangzhou 510006 , China) . pp 1 - 4

Abstract: Infrared radiation from the molten pool contains plenty of welding status information including the characteristics of the seam deviation. Infrared images of the molten pool were captured by an infrared sensitive high-speed camera during high power (10kW) fiber laser butt joint welding of 304 austenitic stainless steel with micro-gap seam (seam gap width was less than 0.1mm) . By analyzing the molten pool characteristics , the information of seam deviation was explored. A keyhole formed when the laser beam was focused on a weldment and the metal vaporized instantly. Features of the keyhole infrared images , especially the characteristics of conjunction between the solid and liquid zones with unstable burr edge of seam were studied. A corner point detection method was proposed to detect the micro-gap seam deviation in high power laser welding process. Experimental results showed that the dense distribution center of the corner points of a molten pool infrared image had a close relationship with the weld seam deviation. The micro-gap weld seam deviation status in high power fiber laser welding can be determined by the corner point distribution density.

Key words: high power fiber laser welding; near infrared thermal image; seam deviation; corner point detection

Embedded system control of consumable DE-GMAW

SHI Yu¹ , WANG Ping² , GUO Jinchang² , FAN Ding¹ (1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal materials , Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050 , China; 2. Welding Team of Process Department in Dongfang Electrical Machinery Co. , Ltd. , Deyang 618000 , China) . pp 5 - 8

Abstract: By applying the embedded system control to carry out the control tests for consumable DE-GMAW , the welding process is unstable , main arc and bypass arc are affected each other , bypass arc length is unstable , bypass current changes seriously , and there is welding defects and poor weld appearance in open loop welding. Stability test of the welding process based on the arc voltage feedback prove that the embedded system can feedback arc voltage in real time , adjust bypass wire feeding rate and control the bypass arc length , make sure welding process stable. Stability test of the welding process based on the current control shows that the embedded system can feedback the bypass current in real time , judge the bypass current change trend , adjust the bypass current in real time , ensure current in base metal to be stable. Applications of the embedded system control of both bypass wire feeding and bypass current ensure stable welding process , avoidance of welding defect and good weld appearance.

Key words: embedded system; consumable DE-GMAW;

arc voltage feedback; control current

Parameter optimization for MAG of DP780

LU Zhenyang , TANG Chao , XIONG Wei , HUANG Pengfei (Welding Institute , Beijing University of Technology , Beijing 100124 , China) . pp 9 - 12

Abstract: Gas metal arc welding parameters were optimized by orthogonal experiments for 2mm thick uncoated DP780 steel plate. The influences of five factors including wire feeding rate , welding speed , arc voltage , wire extension and welding angle on tensile strength of DP780 lap joints were discussed. The range analysis and variance analysis proved that wire feeding rate and welding speed are the main influencing factors on the tensile strength of the join , and the other factors show no regularity to tensile strength. An approximate mathematical model to control the tensile strength of the joint was obtained by fitting the approximate curve through multiple regression analysis , which revealed the regularity of effects of main welding parameters on the tensile strength of the joint.

Key words: AHSS; MAG; process parameter optimization

A welding power supply with half-bridge LLC resonant soft-switching

CHEN Yanming¹ , YANG Meizhen¹ , WANG Zhenmin² , XUE Jiaxiang² , LI Guojin¹ (1. College of Electrical Engineering , Guangxi University , Nanning 530004 , China; 2. College of Mechanical Engineering , South China University of Technology , Guangzhou 510640 , China) . pp 13 - 16

Abstract: By using the magnetizing inductance of transformer , resonant capacitor and additional inductance , a half-bridge LLC resonant welding power supply with constant output voltage was implemented. Through careful analysis and design of relevant parameters (such as the series resonant inductor L_r , series resonant capacitor C_r , and the resonant inductor L_m paralleled with transformer etc) in the resonant tank , the ZVS turn-on can be achieved for primary side power switch , and the ZCS turn-off can be achieved for secondary rectifier diodes over the entire operation region. Hence , the loss and the interference can be decreased , the efficiency can be increased , the switching frequency can be higher so that the weight and the volume of the inductance , the capacitance and the transformer , and so on , can be decreased dramatically , and the dynamic behavior can be improved. The operation principle was also discussed briefly , a 2.5kW half-bridge LLC welding power supply was constructed and the experimental results were presented.

Key words: half-bridge LLC converter; resonant; Zero-voltage turn-on; Zero-current turn-off

Interface microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints between tungsten and ferritic steel with vanadium interlayer

MA Yunzhu , WANG Yanyan , LIU