

基于 RSM 的 GH3128 镍基合金 MIG 堆焊工艺参数优化

刘拥军, 郭占英, 方海鹏

(西南交通大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:研究镍基高温合金 GH3128 表面上堆焊形貌并优化焊接工艺参数,为后续对焊和堆焊修复打下基础。采用通用旋转组合设计试验方案,基于响应面法建立了 GH3128 合金上 MIG 堆焊时焊接速度、送丝速度、焊枪角度与余高、稀释率之间的数学模型并对模型进行了验证分析。基于模型,分析了各个工艺参数对稀释率和余高的影响,并对焊接工艺参数进行了优化。研究表明:余高随着送丝速度的增加而增大,随着焊接速度的增大而降低,焊枪角度对余高的影响最小。稀释率受焊枪角度、焊接速度、送丝速度的影响依次减小。

关键词:GH3128 镍基合金;MIG 堆焊;响应面法;参数优化

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20190630

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2020)15-0114-05

Optimization of MIG Surfacing Process Parameters of GH3128 Nickel Base Alloy Based on RSM

LIU Yongjun, GUO Zhanying, FANG Haipeng

(School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The surfacing morphology on surface of nickel-based superalloy GH3128 was studied and the optimization of welding process parameters was carried out to lay the foundation for subsequent butt welding and surfacing repair. Based on the response surface method, the mathematical model between welding speed, wire feeding speed, welding gun angle of MIG welding on GH3128 and residual height, dilution rate was established by using the universal rotating combination design test scheme. The model was verified and analyzed. Based on the model, the effects of various process parameters on dilution rate and residual height were analyzed, and the welding process parameters were optimized. The results show that the residual height increases with the increase of wire feeding speed, and decreases with the increase of welding speed. The influence of welding angle on the residual height is the smallest. The effect of welding torch angle, welding speed and wire feeding speed on dilution rate decreases in turn

Key words: GH3128 nickel base alloy; MIG surfacing; response surface methodology (RSM); parameter optimization

GH3128 是由中国钢铁研究总院研发的一种固溶强化型镍基合金^[1]。该合金具有较高的塑性、抗氧化性及良好的焊接性能,用于制造长期在 950℃ 下工作的航空发动机燃烧室火焰筒、燃烧室壳体、调节片及其他高温零部件^[2]。由于工作环境恶劣,该合金服役过程中时有失效发生,通常采用堆焊方法修复。修复时,工艺参数是决定焊缝成形的重要因素,合理

选择工艺参数,优化堆焊层形貌,这对获得高质量堆焊层具有重要意义^[3]。

响应面法 (response surface methodology, RSM) 具有效率高、成本较低、优化区域直观显示等优点,用于 GTAW 堆焊、TIG 堆焊、A-TIG 活性焊、激光焊等焊接方法^[3-10]时,通过合理地选取试验点和迭代策略,建立工艺参数与响应值的模型,以此优化焊接工艺参数。Singh 等人^[11]利用响应面法研究了振动焊接技术,结果发现熔池振动频率是影响焊接接头性能最主要的因素。但采用响应面法进行 MIG 堆焊工艺参数优化的研究较少,针对镍基合金 GH3128 的 MIG 堆焊更是微乎其微。为此本文采用响应面法建立 GH3128 镍基合金 MIG 堆焊工艺参数 (焊枪角

收稿日期:2019-03-05

作者简介:刘拥军(1979-),男,四川成都人,讲师,博士,主要研究镍基合金焊接以及焊接设备自动化;

E-mail:swjtuliuyongjun@163.com

通讯作者:郭占英(1993-),男,硕士,研究方向:镍基合金的焊接性能及焊接设备自动化;E-mail:pustblume@yeah.net

度、焊接速度、送丝速度)与响应值(余高、稀释率)的数学模型,并探求工艺参数对GH3128堆焊焊缝形貌的影响,这对实现GH3128堆焊形貌预测、堆焊修复及对焊研究具有重要意义。

1 试验方案

试验选用配备ABB焊接机器人的福尼斯Transpuls Synergic4000型焊机。试验母材为8mm厚镍基合金GH3128,焊丝采用ERNiCrMo-3($\phi 1.2$ mm),母材和焊丝成分见表1。

表1 母材及焊丝化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of base material and welding wire (wt%)

元素	Ni	Cr	Ti	Fe	Mo	Nb+Ta	Al	W	C	Si
GH3128	54.9~65.2	19~22	0.4~0.8	0.2	7.5~9.0	0	0.4~0.8	7.5~9.0	0.5	0.8
ERNiCrMo-3	58Min	0~23	0.4Max	5.0Max	8~10	3.1~4.1	0.4Max	0	0.1Max	0.5Max

参数的取值范围,制定了三因子四水平的通用旋转组合设计实验方案(central compositied design, CCD)^[12],其真实值与编码值的关系为:

$$X_i = 1.682 \times \frac{[2X - (X_{\max} + X_{\min})]}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: X 为设计因素最大值 X_{\max} 和最小值 X_{\min} 中间的某一值; X_i 是实际变量 X 的编码值,其值由式(1)计算。详细试验设计因素及其编码值^[13-14]见表2。

表2 试验设计因素及编码值

Tab.2 Test design factors and coding values

变量因素	$V_w/(mm \cdot s^{-1})$	$V_f/(m \cdot min^{-1})$	$\theta/(^{\circ})$
上水平(1)	5	7	90
零水平(0)	4	6	75
下水平(-1)	3	5	60
$r(1.682)$	5.682	7.682	100.23
$-r(-1.682)$	2.318	4.318	49.77
标准差	1	1	15

按照CCD设计方案完成GH3128的堆焊^[15],堆焊层截面经过打磨、抛光、腐蚀(腐蚀剂配方^[16]为92% $HCl+5\%H_2SO_4+3\%HNO_3$),采用XTL-340E体式显微镜观察焊缝形貌,测量焊缝形状特征参数。余高可从体式显微镜中直接读取,稀释率则通过计算获取,余高和稀释率参数的测量如图1所示。其中, S_a 为上半部分面积, S_b 为下半部分面积,稀释率 $D=S_b/(S_a+S_b)$ 。试验方案及响应值见表3。

2 试验结果及分析

2.1 数学模型的建立与检验

基于试验选取的变量因素 θ 、 V_w 和 V_f ,响应方

由于Transpuls Synergic 4000型焊机采用专家系统控制(焊接电流跟随焊接速度变化,其值由专家系统控制),因此以焊接速度(V_w)、送丝速度(V_f)和焊枪角度(θ)为变量因素,以稀释率(D)、余高(H)为响应值,在焊接过程中其它参数如气体流量、干伸长恒定。焊接工艺参数的取值范围决定了所建模型的可行性、预测结果的准确性和实用性^[4]。为保证电弧稳定燃烧,得到连续、表面无可见缺陷的堆焊层,本文首先进行了单因素焊接工艺实验,通过分析焊缝形貌确定了焊接速度、送丝速度以及焊枪角度三个

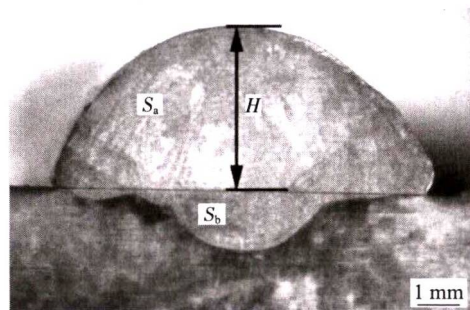


图1 堆焊截面

Fig.1 Cross section of surfacing

表3 试验方案及响应值

Tab.3 Test scheme and response value

序号	编码值			试验值	
	θ	V_f	V_w	H/mm	$D(\%)$
1	-1	-1	-1	4.007	5.105
2	1	-1	-1	4.542	5.66
3	-1	1	-1	3.711	5.236
4	1	1	-1	3.479	5.175
5	-1	-1	1	5.51	5.632
6	1	-1	1	4.792	6.46
7	-1	1	1	4.153	6.409
8	1	1	1	3.812	7.57
9	-1.682	0	0	4.601	4.371
10	1.682	0	0	4.208	8.125
11	0	-1.682	0	5.709	5.887
12	0	1.682	0	3.843	7.93
13	0	0	-1.682	4.646	6.951
14	0	0	1.682	4.593	7.469
15	0	0	0	4.218	7.425
16	0	0	0	4.371	7.584
17	0	0	0	4.251	8.328
18	0	0	0	4.477	8.168
19	0	0	0	4.668	7.109
20	0	0	0	4.513	7.231

程^[17]可以表示为:

$$E_y=f(\theta, V_w, V_f) \quad (2)$$

则用于描述三因素响应面的回归方程^[18]可以表示为:

$$Y=\beta_0+\sum_{i=1}^3\beta_iX_i+\sum_{i=1}^3\beta_{ii}X_i^2+\sum_{i<j}^3\beta_{ij}X_iX_j+\varepsilon \quad (3)$$

式中: Y 为响应值; X_i 为考察因子; θ 、 V_w 和 V_f 分别为焊枪角度、焊接速度和送丝速度; β_0 、 β_i 、 β_{ii} 、 β_{ij} 为回归系数; ε 为误差。

根据表 3 试验数据, 采用 DesignExpert 进行二次回归响应面分析, 并剔除不显著项, 分别得出了以焊接速度、送丝速度和焊枪角度为变量, 以余高和稀释率为响应值的编码值方程和真实值方程。

余高编码值方程:

$$H_{\text{code}}=4.41-0.1\theta-0.5V_w+0.18V_f-0.049\theta V_w-0.17\theta V_f-0.12V_w V_f \quad (4)$$

余高真实值方程:

$$H_{\text{act}}=-3.162+0.0742\theta+0.477V_w+1.512V_f-0.003\theta V_w-0.011\theta V_f-0.122V_w V_f \quad (5)$$

稀释率(%)编码值方程:

$$D_{\text{code}}=7.67+0.64\theta+0.36V_w+0.42V_f-0.035\theta V_w+0.19\theta V_f+0.28V_w V_f-0.67\theta^2-0.43V_w^2-0.33V_f^2 \quad (6)$$

稀释率(%)真实值方程:

$$D_{\text{act}}=-23.364+0.423\theta+2.335V_w+2.3V_f-0.002\theta V_w+0.012\theta V_f+0.28V_w V_f-0.003\theta^2-0.434V_w^2-0.328V_f^2 \quad (7)$$

对数学模型进行检验, 余高、稀释率模型的方差分析结果见表 4。 F 检验为方差齐次性检验的值, 对于显著性检验来说, 如果模型 $\text{prob}>F$ 的值小于 0.05, 说明方程的回归关系是显著的^[9]。由表 4 中数据可以看出, 余高和稀释率的回归方程的显著性明显。对失拟项检验来说, 如果失拟项 $\text{prob}>F$ 大于 0.05, 说明所得方程与实际拟合中非正常误差所占比例小, 即失拟项不显著, 回归方程拟合较好^[9], 据表 4 数据得知余高和稀释率的模型回归关系显著, 拟合良好。

表 4 数学模型的方差分析表

Tab.4 Mean square analysis of mathematic model

模型	平方和	F 值	均方差	失拟项 prob>F	模型 prob>F
H	4.37	7.51	0.73	0.0501	0.0012
D	19.99	3.18	2.22	0.0600	0.0430

2.2 焊接参数对响应值的影响

2.2.1 焊接参数对余高的影响

焊接参数对余高的影响规律如图 2 所示。在 CCD 设计中, 对各因素无量纲线性化处理, 使得编码值回归方程各次项系数不相关, 这样可根据回归方程中各系数绝对值大小直接比较因素对响应值的影响程度。结合余高的编码回归方程(4)可知各工艺参数对余高的影响大小顺序为 $V_w>V_f>\theta$ 。由图 2 可知, 堆焊层高度随焊接速度增加而减小, 随送丝速度的增加而增加。焊枪角度增大会降低余高, 但影响不显著。

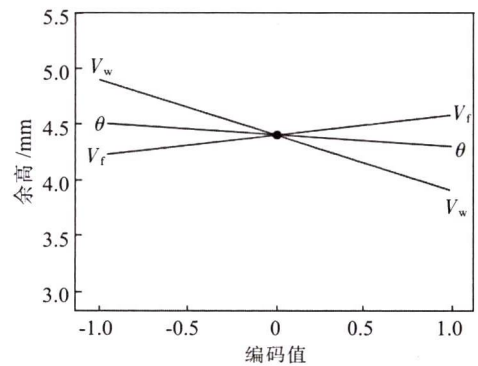


图 2 焊接参数对余高的影响

Fig.2 Effect of welding parameters on reinforcement

焊接过程中交互作用的影响是由热、力、磁等多物理场耦合引起的, 耦合关系复杂^[20]。为了分析工艺参数之间的交互效应, 采用与单因素分析相似的方法, 固定方程中除交叉项所涉及参数以外的变量为零水平值, 将得到的交互作用方程在三维坐标中绘图, 便可获得各个焊接参数交互作用与余高之间的关系曲面, 如图 3 所示。由图 3(a)、(b)知焊接速度和送丝速度一定时, 角度对余高的影响不明显。图 3(c) 响应面倾斜度高, 表明焊接速度和送丝速度对余高实际值的交互影响最明显。

2.2.2 焊接参数对稀释率的影响

焊接各个参数对稀释率的影响如图 4 所示, 并结合结合编码值方程(6)可以得知焊枪角度编码值小于零($60^\circ\sim 75^\circ$)对稀释率影响较显著。焊接速度对稀释率有着双重作用: 一方面增大焊接速度会降低焊接线能量而使得稀释率降低, 另一方面增大焊接速度会减小单位长度焊缝上焊丝的熔敷量而使得稀释率增大, 由于双重作用使得稀释率值随着焊接速度编码值增大而先升后降。送丝速度的增加会增加焊接电流, 但是由于出丝量大, 加之镍基合金流动

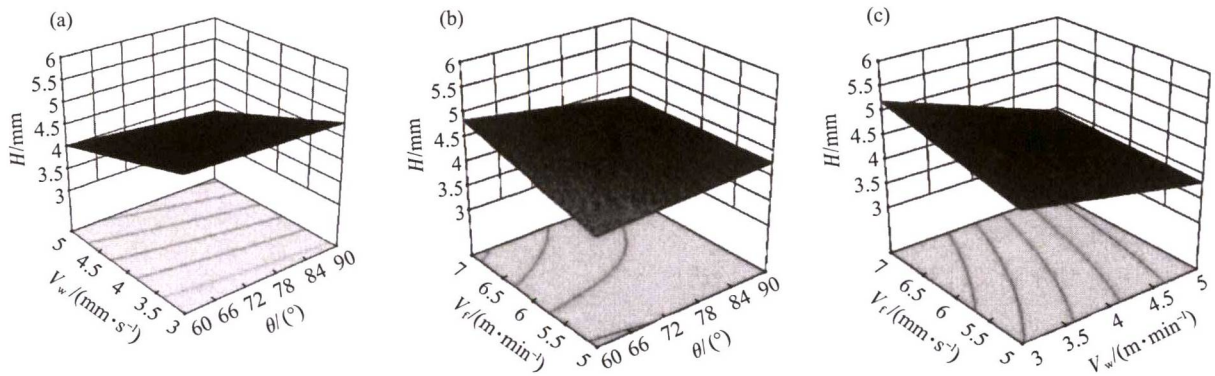


图3 焊接参数对余高的交互影响
Fig.3 Interaction of welding parameters on reinforcement

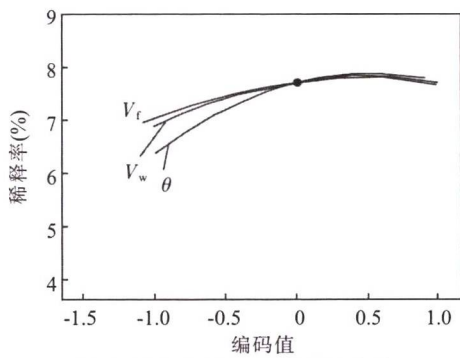


图4 焊接参数对稀释率的影响
Fig.4 Effect of welding parameters on dilution rate

性差, 导致随着送丝速度增加使得稀释率先增大后减小。

图5为焊接参数对稀释率的交互影响, 根据稀释率编码值方程(6)可知送丝速度和焊接速度的交互作用最强, 但曲面图变化不明显, 这是因为焊接专家系统决定送丝时焊接电流大小, 送丝速度大时, 焊接电流大, 热输入大, 增大稀释率; 增大焊接速度对母材的热作用时间相对变短, 从而使得母材的熔化量减少, 降低稀释率, 两者的综合作用使得图5(c)变化不明显^[21-22]。

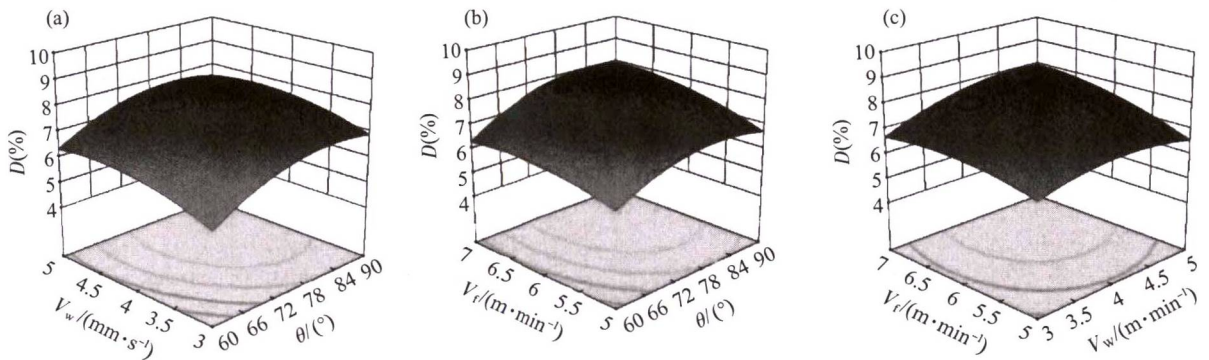


图5 焊接参数对稀释率的交互影响
Fig.5 Interaction of welding parameters on dilution rate

3 焊接参数优化

研究 GH3128 堆焊时, 镍基合金的流动性较差, 堆焊层形貌受焊接工艺参数的影响较大。实际工程中为保证生产效率, 希望采用较大的焊接速度。因此, 提出焊枪角度、焊接速度和送丝速度的最优组合对于获得高质量焊件和提高生产效率具有重要的意义^[20]。试验中以稀释率最小、余高达到 4mm 为优化目标, 利用 DesignExpert 软件优化得 12 组参数组合。由于各组参数差别非常小, 为验证数学模型准确性, 在优化的结果中选取一组 (即焊枪角度

83.763°, 焊接速度 4.65 m/min, 送丝速度 7 m/min, 预测余高 4 mm, 预测稀释率 8.241%) 进行 3 次堆焊试验, 验证结果及误差见表 5, 试验值与预测值误差均小于 5%, 证明预测良好, 模型可靠。

表5 试验验证结果及误差
Tab.5 Test results and errors

序号	余高 H/mm		稀释率 D(%)	
	试验值	误差(%)	试验值	误差(%)
1	3.823	4.250	8.521	3.286
2	4.119	2.975	8.330	1.068
3	3.973	0.575	7.897	4.356

4 结论

(1) 基于 CCD 设计试验, 并采用 RSM 建立 GH3128 堆焊工艺参数与响应值的数学模型。其预测值与试验结果值吻合良好, 证明所建模型可用于焊缝形貌预测及工艺参数优化。

(2) 文中模型分析及试验结果表明: 送丝速度增加将会加大余高, 而焊接速度增大会降低余高; 焊枪角度对堆焊层稀释率影响最大, 焊接速度影响作用次之, 送丝速度影响最小; 焊接参数交互作用的影响中, 焊接速度和送丝速度对稀释率的交互作用最强但影响不明显, 焊接速度和送丝速度对余高的交互影响最明显。

(3) 以堆焊形貌为指标, 在余高达到 4 mm 时, 得到的一组优化的焊接参数组合为: 焊枪角度 83.763°, 焊接速度 4.65 m/min, 送丝速度 7 m/min。

参考文献:

- [1] 原鲲, 赵熹, 叶萍, 等. 确定 GH3128 高温拉伸性能设计许用值的方法原法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2014, 54(9): 1236-1239.
- [2] 杜文浩. GH3128 镍基高温合金液相扩散连接工艺及组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [3] 梁恩宝, 胡绳荪, 王志江. 基于响应面法的 Inconel 625 镍基合金 GTAW 堆焊工艺优化[J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 85-88
- [4] 郭龙龙. 脉冲 TIG 堆焊 Inconel625 工艺及堆焊层组织性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [5] 孟繁亮, 罗震, 姜岩, 等. 基于响应面法的活性焊工艺参数优化[J]. 焊接技术, 2012, 41(12): 22-25.
- [6] 徐茂, 刘双宇, 李彦清, 等. 基于响应面法的 SPCC 与 65Mn 异种金属激光焊接工艺参数优化[J]. 应用激光, 2017, 37(3): 362-366.
- [7] 王洪潇, 史春元, 王春生, 等. 基于响应面法的不锈钢车体激光焊接工艺参数优化[J]. 焊接学报, 2010, 31(10): 69-73.
- [8] 褚振涛, 于治水, 张培磊, 等. 基于响应面分析的 T 型接头激光深熔焊焊缝形貌预测及工艺参数优化[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 1-8.
- [9] Altarazi Safwan, Hijazi Leen, Kaiser Elke. Process parameters optimization for multiple-inputs-multiple-outputs pulsed green laser welding via response surface methodology [C]// Proceedings of the 2016 IEEE IEEM. 2016: 1041-1045.
- [10] Elmesalamy A S, Li L, Francis J A, et al. Understanding the process parameter interactions in multiple-pass ultra-narrow-gap laser welding of thick-section stainless steels [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1-4): 1-17.
- [11] Singh Pravin Kumar, Kumar S Deepak, Patel D, et al. Optimization of vibratory welding process parameters using response surface methodology [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(5): 2487-2495.
- [12] Srivastava Shekhar, Garg R K. Process parameter optimization of gas metal arc welding on IS:2062 mild steel using response surface methodology [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25: 296-305.
- [13] Gunaraja V, Murugan N. Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 88: 266-275.
- [14] Prabhu R, Alwarsamy T. Effect of process parameters on ferrite number in cladding of 317L stainless steel by pulsed MIG welding [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(3): 1341-1347.
- [15] Acherjee Bappa, Misrab Dipten, Bose Dipankar, et al. Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology [J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41: 956-967.
- [16] 王哲仁, 邵焕平, 张红英. 不同固溶处理对 GH128 晶粒度和显微组织的影响 [J]. 机械工程材料, 1994, 18(4): 26-28.
- [17] Sowrirajan M, Mathews P K, Vijayan S, et al. Effect of weld dilution on post-weld thermal conductivity of austenitic stainless steel clad layers [J]. Materials Research Express, 2018, 5(9): 1-11.
- [18] Martinez-Conesa E J, Egeab J A, Miguel V, et al. Optimization of geometric parameters in a welded joint through response surface methodology [J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 105-114.
- [19] Choudhury Bishub, Chandrasekaran M. Study on gas tungsten arc welding characteristics of nickel based aerospace alloys [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 7337-7345.
- [20] Vasantharaja P, Vasudevan M. Optimization of A-TIG welding process parameters for RAFM steel using response surface methodology [J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2018, 232(2): 121-136.
- [21] Liao Hsin-Te, Chen Zhi-Wei. A study on fiber laser micro-spot welding of thin stainless steel using response surface methodology and simulated annealing approach [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5-8): 1015-1025.
- [22] Ganjigatti J P, Pratihari D K, Roy Choudhury A. Modeling of the MIG welding process using statistical approaches [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 35(11/12): 1166-1190. 