

TIG焊熔透正面监测量的确定

张裕明 吴 林 李 林^① 陈定华 刘建国^②

(哈尔滨工业大学)

摘 要 熔透的闭环控制是焊接界瞩目的前沿课题,而从焊接工件正面实时提取熔透信息又是其技术关键。本文通过严格的实验和统计分析发现,焊缝的背面熔宽与焊缝的正面平均下塌量(即焊缝正面下塌面积与正面熔宽之比)间存在良好的对应关系,这就为使用结构光三维视觉传感器实时检测熔透奠定了基础。

关键词 熔透;建模;TIG焊;视觉

0 序 言

从焊接工件正面提取熔透信息是熔透控制的基本研究课题。超声波法^[1]可以从焊接工件的正面提取熔透信息,但它要求传感器与工件紧密接触。熔池振荡法可从焊接工件正面测得定点TIG焊熔池的熔深^[2],但在应用于薄板熔透信号正面提取时遇到了熔池移动影响熔池尺寸测量精度的困难;虽然已提出电弧步进移动点焊熔池相连和利用熔池对交变焊接电流的谐振来克服这一困难^[3],但尚在继续完善中。对于以检测熔池表面几何参数或温度场参数来从正面获得熔透信号的方法^[4],则尚需对所检测参数与熔透之间的关系进行进一步研究。

受熟练焊工通过熔池根部的观察来获取熔透信息的启发,作者研究发现,焊缝正面平均下塌与背面熔宽间有良好的对应关系。因此,在熔池根部处焊缝正面平均下塌即为熔透的正面特征量,可以选为熔透的正面监测量。在此基础上,作者系统地提出并完成了一种新的熔透正面控制方法:TIG焊熔透正面视觉自适应控制。本文工作是熔透正面监测量的确定,而有关熔透正面监测量的实时提取及反馈控制可参见文献[5,6]。

1 焊缝几何参数及测试

图1 a)是一全熔透试件横截面,它为以焊缝切线为法线的平面与工件的交。当以理想光平面(无厚度)代替此平面时,可得到光平面与工件的交(称为焊缝光纹),从而得到图1 a)试件中的上下边缘,见图1 b)。显然,图1 b)的边缘曲线包含了焊缝的几何特征,需对其采用合适的参数(称为焊缝几何参数)加以描述,以便得到能反映b)的正面特征参数。

^①现在陕西省人民银行

^②现在福建省三明市



图 1 全熔透试件横截面

Fig. 1 Transverse section of full-penetration test piece

a) Photograph b) Schematic diagram

按照普通的作法, H 和 b 应选作焊缝几何参数, 但研究表明^[1], 当采用 H 和 b 来描述 b_b 时, 为得到精度较高的关系, 尚需使用 S , 而且 S 是一个极为重要的参数。于是, 为实现 b_b 的控制, 需控制 H 、 b 和 S 等三个参数, 这就极大地复杂了控制系统。为此, 作者选 S/b 形成新几何参数进行尝试, 结果发现, 仅 S/b 即可对 b_b 进行精度良好的描述。因此, 作者将 $h = S/b$ 定义为平均下塌, 并将其作为焊缝几何参数之一。

为测量实际焊缝的几何参数, 采用了 He-Ne 光平面 (由 2mw 的 He-Ne 激光束经柱面镜形成) 与工件形成焊缝光纹, 并由摄像机和图像接口得到数字化图像 (图 2 a)。对图 2 a 进行处理以计算焊缝几何参数的步骤是: (1) 对图 2 a) 的光纹进行细化 (即提取中轴) 以得到图 1 b) 中的边缘曲线; (2) 确定特征点 a 、 b ; (3) 拟合中轴曲线并由所拟合曲线的参数计算出平均下塌 h 和熔宽 b 。图 2 b) 和图 2 c) 分别为图 2 a) 的中轴提取结果及特征点与中轴拟合结果, 其具体方法参阅文献[5]。

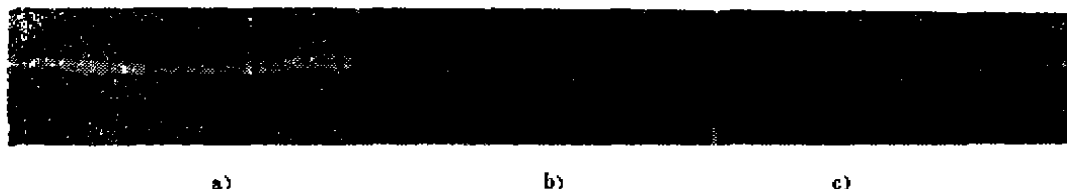


图 2 焊缝光纹图像的处理

Fig. 2 Processing of the image of weld with laser stripe

a) Original image b) Resulted middle axis of the stripe c) Resulted feature points and modelled middle axis

2 试 验

为采用统计方法得到 b_b 与正面几何参数的关系, 需要通过试验获得所需全熔透试件, 并测量出对应的正面和背面几何参数数据。

为使试验数据体现所准备应用的场合, 实验做了如下考虑:

1) 对接间隙: 考虑到薄板在大多数情况下要求对缝良好, 对接间隙小, 故试验时的对接间隙以自然间隙 (由普通剪板机剪后的试件不经加工对接) 为主, 此时对接间隙呈随机分布, 最大间隙约 0.5mm。同时, 为了模拟实际中可能出现的间隙, 还进行了从 0 到 0.5mm 的间隙逐渐变大的试验。

2) 错边: 由于错边太大时图象处理还不能得到比较准确的结果, 故试验时错边控制在 0.5mm 以下。

3) 工件尺寸: 对接工件尺寸如图 3 a, 其厚度为 3mm 的 0Cr18Ni9Ti 不锈钢。同时, 为了模拟散热条件变化和考虑堆焊的情况, 还采用如图 3 b) 的变厚度不锈钢工件进行堆焊试验。

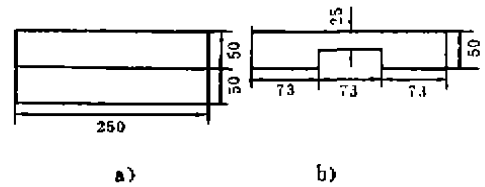


图 3 试件尺寸
Fig. 3 Size of testpieces
a) For butt b) For bead-on-plate

4) 钨极端部几何形状: 试验时使用了端部较秃的和较尖的钨极, 角度分布在 45° 至 60° 之间。

5) 氩气流量: 多数情况下流量为 10L/min, 有的情况为 5L/min。根据上面的考虑确定进行表 1 所列试验。

表 1 试验项目
Table 1 Experimental items

No.	Names of experiment	Notes
1	Butt under natural interspace	10L/min
2	Butt under natural interspace	10L/min
3	Butt under variable argon flow rate	From 10 L/min to 5 L/min at the center of the path
4	Butt under variable interspace	10 L/min, the interspace increases gradually from 0 to 0.5mm
5	Bead-on-plate under variable heat transfer circumstance	10 L/min, see figure 3 b) for the size of the testpiece

试验时, 焊接速度为 2 mm/s, 而焊接电流, 弧长, 电极形状与电极角, 夹头位置等这里不予赘述。

图 4 是经测试得到的试验试件焊缝几何参数 (单位均为像素, 但 b , b_b 等熔宽类参数每像素为 0.05mm, 而 h , b_b 等下塌类参数每像素为 0.0436mm^[5]), 其每一采样点的几何参数均为沿焊缝方向的 2 mm 区段内焊缝几何参数的平均值, 是由 3 次采样光纹图像处理得到的。为了将正反面的测试结果在位置上对应起来, 均以试件的开始位置为测量的起始位置。由于每块试板焊缝约 200mm 长, 故每块板可获得约 100 对与焊缝对应的有效数据。

3 背面熔宽与正面几何参数的关系

为了描述 b_b 与 $[b, h]^T$ 的关系, 作者选用了如下模型结构:

$$b_b(t) = a_0 + a_1 b(t) + a_2 h(t) + a_3 b(t)h(t) + a_4 b^2(t) + a_5 h^2(t) + a_6 b^2(t)h^2(t) + a_7 b^{1/2}(t) + a_8 h^{1/2}(t) + a_9 b^{1/2}(t)h^{1/2}(t) + \varepsilon_b(t) = a^T x_b(t) + \varepsilon_b(t) \quad (1)$$

其中

$$a = (a_0, a_1, \dots, a_9)^T \quad (2)$$

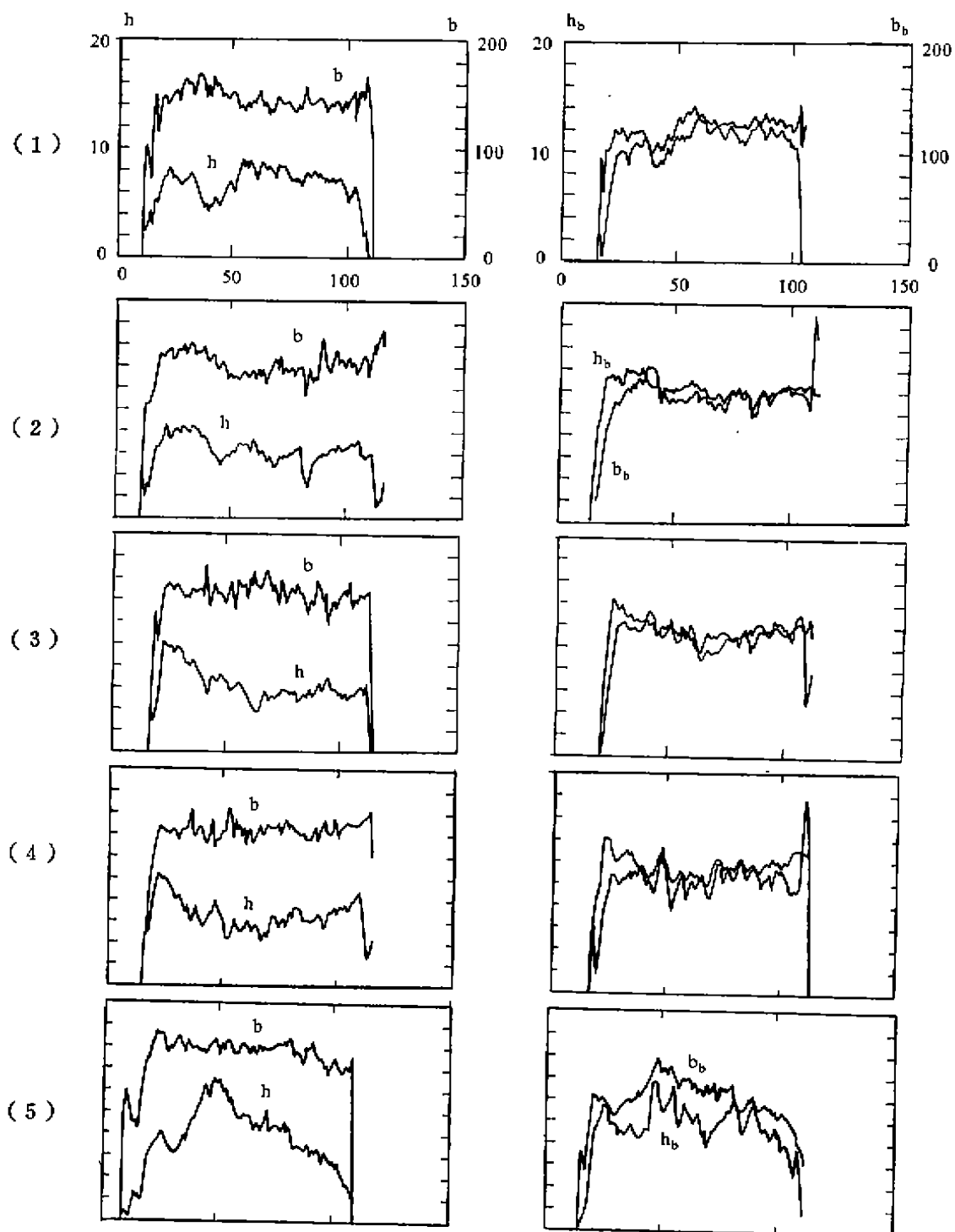


图4 焊缝几何参数测量结果

Fig. 4 Measured geometrical parameters of weld
(1) Testpiece 1 (2) Testpiece 2 (3) Testpiece 3 (4) Testpiece 4 (5) Testpiece 5

$$x_b(t) = [1, b(t), h(t), b(t)h(t), b^2(t), h^2(t), b^2(t)h^2(t), b^{1/2}(t), h^{1/2}(t), b^{1/2}(t)h^{1/2}(t)]^T \quad (3)$$

而 ε_b 是模型残差。易知, α 的最小二乘估计^[3]为:

$$\hat{\alpha}_b = (\Phi_b^T \Phi_b)^{-1} \Phi_b^T B_b \quad (4)$$

其中

$$\Phi_b = [x_b(1), \dots, x_b(N)]^T \quad (5)$$

$$B_b = [b_b(1), b_b(2), \dots, b_b(N)]^T \quad (6)$$

在实际建模时, 往往只选择(3)式中的部分回归因子, 此时结果只须作相应的变动即可。

为充分利用人工经验在因子选择上的作用, 这里的回归因子由作者根据过程的情况依经验给出, 而最后的结果由F检验和使用要求综合确定。建模所用数据为各试件除启弧和收弧段外中间部分的70对点, 故建模时样本数 $N=350$ 。首先进行单因子回归, 所选回归因子及结果如下:

回归因子	$\hat{\sigma}$	J
b	10.6	39332.5
h	6.23	13623.4
b_h	6.86	16466.8

其中 J 是残差平方和, $\hat{\sigma}$ 是模型残差根方差的估值。从上可见, 就单因子来看, h 的效果最好, b 次之, b_h 再次之。再进行如下的双因子回归:

回归因子	$\hat{\sigma}$	J
h, b	6.12	1310.6
h, b_h	6.15	13240.7
b, b_h	6.10	1309.2

此时 b, b_h 回归效果最好, 但三种双因子模型间的回归效果差别不明显。与单因子模型比较, 双因子的最优模型(即 b, b_h 为回归因子的模型)较单因子的最优模型(以 h 为回归因子的模型)的精度有所提高, 其 $F = (13623 - 13093) \times 350 / 13039 = 13.70$ 。于是, 从统计的角度来看, 单因子到双因子的因子添加是合适的。但在 b, b_h 基础上再添加其他因子则得不到更佳的结果。

由上面的讨论知, 双因子模型从F检验的角度来看, 是优于单因子模型的。但是, 两者间模型残差根方差的估值的差别非常小, 这在实际使用时是无关紧要的。于是, 为简便和突出重点起见, 作者决定选用以 h 为回归因子的模型描述背面熔宽与正面几何参数间的关系:

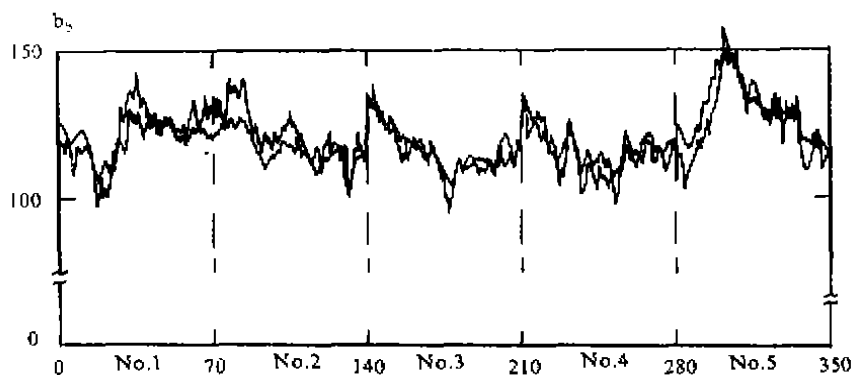
$$b_b = 85.81 + 4.94h \quad (7)$$

其误差的根方差为6.23(像素), 也即0.31mm, 而图5是采用该模型对背面熔宽的预测与测量结果的比较。从图5可见, 这两条曲线差别很小, 故模型的精度良好。

上面给出了背面熔宽与正面几何参数间的关系。由于这里的 h 是平均下塌深度, 为下塌面积除以熔宽, 故式(7)的结果并不说明 b 不影响背面熔宽。

必须指出, 由于建模所用数据的分布有一定的范围, 而且结果是由统计分析得到的, 故所得结论只能在此范围内才能保证适用。该范围约为 $h \in [4, 10], b \in [125, 170]$ 。当然, 由于

试验前作者已考虑了数据范围问题,故该范围与使用模型的范围是吻合的。



Note: The abscissa is the order number of sample and No. is the order number of test piece

图5 背面熔宽的模型预测与实测的比较

Fig. 5 Comparison between predicted and measured backside weld width

4 熔透正面监测量

由背面熔宽与正面几何参数关系的研究知,正面平均下塌可以很好地反映熔透的状况,故应选择正面平均下塌作为熔透的正面监测量。但是,考虑到平均下塌为正面下塌面积 S 与熔宽 b 之比 S/b ,以及焊缝成形均匀对熔宽 b 均匀的要求,最后确定以平均下塌 h 和熔宽 b 共同作为熔透的正面监测量。

5 结 论

本文在典型焊接条件下对3 mm不锈钢(OCr18Ni9Ti)板进行了堆焊对接。在此基础上得到结论如下:

- (1) 背面熔宽与焊缝平均下塌间存在良好的线性对应关系。
- (2) 可以通过对正面平均下塌和熔宽的监测与控制来达到对熔透的监测与控制。

这就为作者提出以结构光三维视觉传感器来获取熔透监测量,从而为熔透的正面实时检测奠定了理论基础,也为作者提出熔透的正面视觉控制方法奠定了基础。

(1990年7月18日收到初稿)

参 考 文 献

- 1 Hardt D E et al. W.J., 1984, 63(9): 273s-80s
- 2 Renwick R J and Richardson R W. W.J., 1983, 62(2)
- 3 杨春利, 王其隆, 张九海, 隋士龙. 第六届全国焊接学会会议论文选集, Vol. 6, 125-129, 1990. 5, 西安
- 4 Clocksin W F, et al. Int. J. Robotics Res., 1995, (4): 13-26
- 5 张裕明, 吴林. 熟练焊工熔透信息获取的人工模拟. 第二届宇航学会机器人学术讨论会论文集, 1990, 哈尔滨.
- 6 张裕明, 吴林, 李林, 陈定华. TIG焊熔透过程的建模与控制(上)(下). 全国控制理论及其应用年会论文集, 1990, 杭州.
- 7 刘建国. 正面视觉TIG焊熔透信息的研究. 哈尔滨工业大学焊接专业硕士论文, 1989
- 8 上海师大. 回归分析与试验设计. 上海教育出版社, 1978.

Determination of top supervision parameters for state of full penetration in TIG welding

Zhang Yuming, Wu Lin, Li Lin,
Chen Dinghua and Liu Jianguo
(Harbin Institute of Technology)

Abstract Closed-loop control of full penetration is an attention-focussed problem in the field of welding because it is very difficult to measure the state of full penetration from the top side of the weld. In this contribution, it is discovered that based on strict experiments and statistic analysis there is a close relationship between the backside weld width and the average top surface depression depth (weld depression cross-sectional area divided by weld width). This discovery provides a basis for the authors presentation of a new control strategy for full penetration where the real time measurement of the state of full penetration is done by a structured-light 3D vision sensor.

Key words full penetration; modelling; TIG welding; vision

《焊接学报》征稿简则

为了扩大本刊对国外的影响,加强国际间的学术交流,本刊从1991年开始采用英文标注图表。为此,对稿件要求作了新的补充规定:

1. 中英文对照项目为:①题目;②作者单位;③摘要;④关键词;⑤图题、表题(包括图、表中的内容及注示);⑥作者姓名用汉语拼音。英文请打字或用印刷体书写。
 2. 文稿务求论点鲜明、数据可靠、文字精炼,书写工整。字数限于5000字以内。
 3. 图稿必须少而精,不得超过5幅。照片要黑白分明、轮廓清楚。描图线条要准确,符合制图规则。
 4. 表格基本采用三线表,一般不用竖线。
 5. 文、图、表中的量、单位和符号必须采用法定计量单位。要清楚标明大小写、正斜体和上下角;容易混淆的英文、希腊文、拉丁文、俄文等请用铅笔注出。
 6. 参考文献按照GB7714-87著录格式。如:
〔期刊〕:作者,题名,刊名,出版年,卷(期):页次
〔图书〕:作者,书名,译者,版本,出版地:出版者,出版年,页次
〔论文集〕:作者,题名,见(In):原文献责任者(编者ed,多编者eds)文集名,会议名,会址,开会年,出版地:出版者,出版年,页次
 7. 来稿必须一式两份,并附上保密证明和作者对论文的评价。作者请自留底稿,来稿一律不退。投稿后6个月内未收到本刊录用通知时,可自行处理。
- 符合上述要求的稿件,本刊优先录用。欢迎踊跃投稿。

本刊编辑部