

高强钢点焊的压痕特征图像识别及其与焊点质量关系分析

张旭强, 于志浩

(中国石油大学(华东), 青岛, 266580)

摘要: 高强钢以其优良的性能广泛应用于工业生产,但在点焊过程中,高强钢的点焊特征难以提取,评价焊点质量较为困难.电极压痕是焊点表面形貌与电极端面的直接反映,压痕图像中同时包含着焊点与电极磨损信息.通过图像处理与识别的方法对压痕进行轮廓边缘检测与识别,采用椭圆拟合的方法提取压痕特征参数.对压痕特征参数与焊点熔核直径进行分析,研究各个特征对焊点质量的影响.结果表明,椭圆拟合的压痕轮廓能够近似代替实际轮廓,压痕特征中提取的平均轴长和点蚀面积与焊点质量之间呈显著的负相关性.

创新点: (1) 采用图像处理的方法对高强钢压痕图像进行处理与特征提取.

(2) 采用压痕的拟合椭圆代替其实际轮廓,并分析了压痕图像的特征与焊点质量之间的关系.

关键词: 焊点质量;边缘检测;图像处理;电极压痕

中图分类号: TG 455

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20200804002

0 序言

电阻点焊以其操作简单、生产效率高和成本低等特点广泛应用于各种工业生产的板材连接中.随着对板材要求的提高,越来越多的生产中采用具有高强度、抗腐蚀性的镀锌钢板取代传统的钢板.与传统的钢板相比,镀锌高强钢在点焊过程中存在着点蚀磨损特征变化显著、电极磨损严重和焊接工艺性较差等问题^[1-3].而且电阻点焊过程复杂、温度变化快以及具有强耦合性,使得对焊点的状态信息采集较为困难.目前点焊质量的评价主要依赖于人工目测和破坏性试验,但这两种方法成本高、周期长,难以适应自动化生产^[4].

随着工业相机和计算机的发展,图像处理技术已被广泛应用在焊接工业领域,包括对焊接电弧形貌以及几何特征参数的提取,对焊接电弧边缘检测等^[5-6].与焊点状态信息相比,电极压痕信息具有容易采集、变化稳定、能够反映电极状态和焊点表面形貌等特点^[7].因此采用图像处理与识别的方法提

取高强钢点焊压痕特征,分析特征与焊点质量的关系,对焊点质量评价有重要意义.

1 电极压痕获取与灰度图像特征分析

搭建基于伺服焊枪的点焊试验平台,采用 1.0 mm 与 0.8 mm 两种厚度的 DP600 双相钢板作为焊接母材,制备的试验样件规格参数为 100 mm × 38 mm,样件搭接区域为 38 mm × 38 mm.选择材料为铬锆铜(Cr 和 Zr 的质量分数分别为 0.7%, 0.1%)直径 5 mm 的球形电极.根据 DP600 双相钢焊接工艺窗口,以表 1 所示参数进行焊接试验.

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding parameters

厚度 δ/mm	电流 I/kA	时间 $T(\text{cycle})$	电极力 F/kN	水冷流量 $q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
0.8	10	10	2.2	8
1.5	11	18	4.3	8

以所选定的参数进行焊接试验,每隔 60 ~ 120 点选择 2 个焊点样件.同时利用碳复印法拓取当前点数下的电极压痕,并通过 CCD 相机扫描存储为数字图像.所选择的焊点样件先用于拉伸-剪

切试验,以获取不同焊接点数下的拉剪力及熔核直径,当焊点拉剪力明显下降并且熔核未能形成时,结束焊接试验。图 1 所示为不同焊接点数下的电极压痕图像,其中白色部分为点蚀区域。从压痕图像中可以看出,焊点大致呈现椭圆形状,焊点边缘因点蚀产生不连续区域。图 2 所示为压痕图像的灰度分布图,图像中存在少量高斯噪声干扰,图像灰度值主要分布在 0~50 和 128~255 区间。

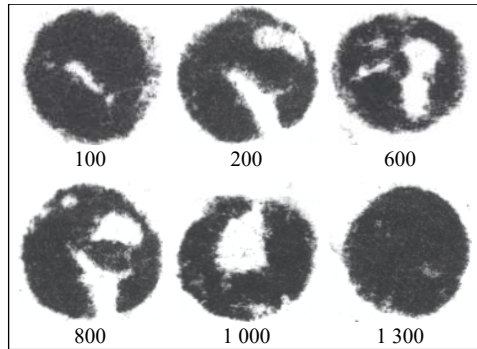


图 1 不同焊接点数下的电极压痕

Fig. 1 Electrode imprint at different welding spot

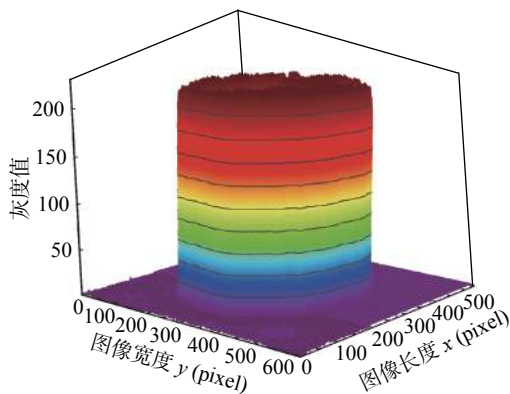


图 2 压痕图像灰度分布图

Fig. 2 Grayscale distribution of imprint image

2 压痕特征的图像识别与提取

图像是蕴含信息最丰富的媒介之一,电极压痕图像能够体现焊点及电极端面的直径、点蚀情况等信息。采用图像处理的方法能够程序化的提取压痕特征并进行分析,可直接将分析结果用于自动化控制,提高系统自动化程度^[8]。对点焊压痕进行图像处理主要分为两部分:一是压痕识别与边缘检测,二是压痕轮廓拟合与特征提取。

2.1 压痕的识别与边缘检测

CCD 相机获取的原始图像因环境、磁场等干

扰,存在边缘虚化、噪声干扰等问题。按照图 3 所示预处理流程对压痕图像进行预处理,以去除无关信息,突出焊点压痕。具体流程为:原始图像经过平滑滤波操作去除高斯噪声,得到平滑图像;选用拉普拉斯算子对平滑图像进行锐化增强,突出边缘信息;根据焊点灰度分布图,采用直接阈值法对压痕图像进行二值化操作,分离焊点与背景;最后进行形态学操作,消除孔洞、缝隙与微小孤立区域,连接非连通区域。预处理前后效果如图 4 所示。

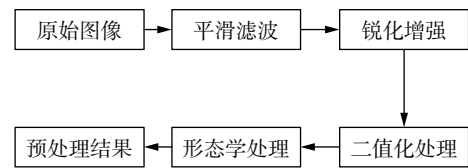


图 3 预处理流程图

Fig. 3 Flowchart of imprint image preprocessing

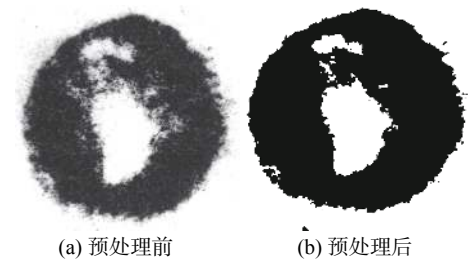


图 4 预处理前后对比

Fig. 4 Contrast of image processing before and after.

(a) processing before; (b) processing after

对预处理后的二值图像进行梯度计算,检测电极压痕轮廓,以便于后续进行轮廓拟合与特征提取。在数字图像处理中,像素点 (x, y) 处的梯度大小可以差分近似代替微分,表达式为

$$|\nabla f| = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \approx |g_x| + |g_y| \quad (1)$$

考虑到预处理后的压痕图像轮廓简单,无复杂结构,因此选用 Sobel 算子计算梯度^[9]。像素点 (x, y) 处 3×3 邻域的像素排列如图 5a 所示,其中 $z_1 \sim z_9$ 为点 (x, y) 邻域的像素值,选择 Sobel 算子模板如图 5b, 5c 所示,此时梯度表达式为

$$g_x = \frac{\partial f}{\partial x} = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3) \quad (2)$$

$$g_y = \frac{\partial f}{\partial y} = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7) \quad (3)$$

代入式 (1),即可求得像素点 (x, y) 处的梯度大小,其中 g_x 对水平方向梯度变化敏感, g_y 对垂直方向梯度变化敏感。

边缘获取是将梯度图像的边缘以点集的方式

$z1$	$z2$	$z3$	-1	0	1	-1	-2	-1
$z4$	(x, y)	$z6$	-2	0	2	0	0	0
$z7$	$z8$	$z9$	-1	0	1	1	2	1

(a) 3×3 邻域 (b) g_x (c) g_y

图 5 Sobel 模板

Fig. 5 Sobel operator. (a) 3×3 neighborhood; (b) g_x ; (c) g_y

保存, 采用 Suzuki 85 算法确定边缘图像边界围绕关系, 并根据轮廓间的拓扑结构进行编码. 选择面积最大的轮廓所对应的点集即为提取到的压痕外围轮廓, 电极压痕外围轮廓如图 6 所示.

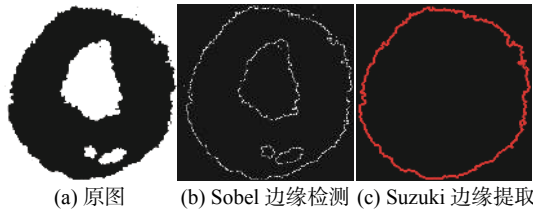


图 6 压痕边缘提取

Fig. 6 Imprint contour extraction. (a) original image; (b) sobel edge detection; (c) suzuki edge extraction

2.2 压痕拟合与特征提取

根据对压痕特征的分析, 压痕形状为近似椭圆形, 因此采用椭圆拟合的方法来近似复原压痕轮廓. 在任意平面位置椭圆的方程可以表示为

$$x^2 + Axy + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \quad (4)$$

椭圆拟合的目标是求解 A, B, C, D, E 这 5 个参数, 拟合算法主要有 Hough 变换法、最小二乘法、随机 Hough 变换法等^[10]. Hough 变换法在参数较少、点集中元素数量较少的情况下效果较好, 但对于压痕轮廓拟合需要的计算量较大. 随机 Hough 变换法与 Hough 变换法类似, 只是随机选择点集中的 5 个元素进行拟合, 误差较大. 因此选择最小二乘法进行椭圆拟合. 设 $P(x_i, y_i)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) 为椭圆轮廓上的 N ($N \geq 5$) 个点, 由最小二乘法的原理可知, 拟合的目标函数为

$$F(A, B, C, D, E) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + Ax_i y_i + By_i^2 + Cx_i + Dy_i + E)^2 \quad (5)$$

若使得 F 最小, 需要令

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \frac{\partial F}{\partial B} = \frac{\partial F}{\partial C} = \frac{\partial F}{\partial D} = \frac{\partial F}{\partial E} = 0 \quad (6)$$

求解方程 (6), 并根据椭圆的基础知识, 可得到拟合椭圆的中心点坐标 (x_0, y_0) , 椭圆长轴 a , 椭圆短

轴 b 和角度 θ . 最小二乘法椭圆拟合效果如图 7 所示, 蓝色轮廓为压痕轮廓边缘, 红色轮廓为拟合椭圆. 从压痕图像中能够提取如下参数: 椭圆轴长参数 a 和 b , 计算椭圆轮廓内白色像素点个数作为点蚀面积 S , 计算压痕轮廓所包围的面积作为电极压痕的名义接触面积 C , 计算椭圆轮廓所包围的面积作为拟合的名义接触面积 E ; 计算压痕轮廓内黑色像素点的面积作为实际接触面积 CB , 计算椭圆轮廓内黑色像素点面积作为拟合接触面积 EB .

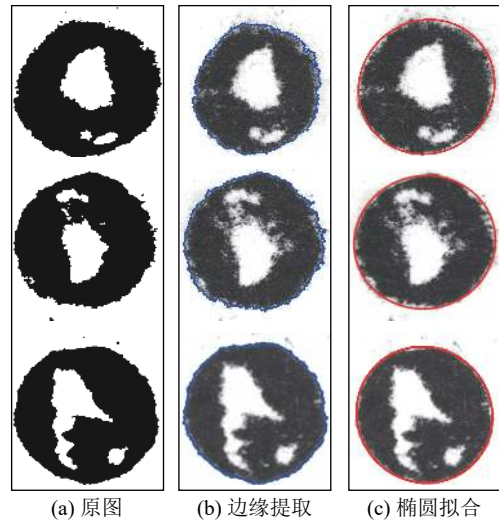


图 7 压痕边缘椭圆拟合结果

Fig. 7 Ellipse-fitted imprint contour. (a) original image; (b) edge extraction; (c) ellipse-fitted

3 压痕特征与焊点质量关系分析

3.1 压痕特征筛选与简化

压痕特征包括压痕直径、点蚀面积、压痕实际面积等. 随机选取 10 个轮廓完整的压痕图像样本进行误差分析, 计算名义接触面积误差 f_e 与实际接触面积误差 a_e , 结果如表 2 所示, 椭圆拟合结果的误差在 3.08% 以下, 能够利用椭圆拟合的参数代替实际参数进行分析, 椭圆拟合轮廓可看作压痕轮廓的复原. 故选择拟合椭圆几何参数 (a, b) 、拟合轮廓内压痕面积 EB 和拟合轮廓内点蚀面积 S 来表征不同点数下压痕的状态. 通过 SPSS 数据分析软件对 a, b, EB, S 和平均轴长 d ($d = a/2 + b/2$) 进行相关性分析, 结果如表 3 所示.

由表 3 中相关性数据可以得出, 平均轴长 d 与椭圆轴长 (a, b) 和拟合椭圆面积 E 之间相关性系数超过 0.997. 因此对特征参数进行筛选与简化, 利用 d 取代 a, b 和 E 3 个特征参数, 以平均轴长 d 与

表 2 拟合参数与实际参数误差分析表
Table 2 Error table of fitted and actual parameters

样本号	$CB(pixel)$	$C(pixel)$	$EB(pixel)$	$E(pixel)$	$f_e(\%)$	$a_e(\%)$
1	68 052	71 952	66 727	72 999	1.46	-1.95
2	92 518	105 656	90 313	105 944	0.27	-2.38
3	88 185	113 235	86 966	113 587	0.31	-1.38
4	77 589	115 641	76 085	115 956	0.27	-1.94
5	90 372	127 984	88 529	129 302	1.03	-2.04
6	106 734	139 384	103 446	140 878	1.07	-3.08
7	109 772	145 838	107 258	147 366	1.05	-2.29
8	122 812	158 875	120 196	159 532	0.41	-2.13
9	117 724	159 088	114 032	160 043	0.60	-3.14
10	122 310	158 223	119 829	159 563	0.85	-2.03

表 3 特征参数 a, b, EB, S 与 d 之间相关性分析
Table 3 Correlation analysis table between characteristic parameters a, b, EB, S and d

参数	EB	a	b	E	S	d
EB	1	0.917	0.933	0.941	0.663	0.928
a	0.917	1	0.988	0.994	0.898	0.997
b	0.933	0.988	1	0.996	0.878	0.997
E	0.941	0.994	0.996	1	0.878	0.998
S	0.663	0.898	0.878	0.878	1	0.890
d	0.928	0.997	0.997	0.998	0.890	1

点蚀面积 S 表示压痕内实际面积 EB , 所提取的压痕轮廓特征参数为压痕的平均轴长 d 、点蚀面积 S .

3.2 压痕特征与焊点质量的关系

电阻点焊是一个十分复杂的过程, 焊点质量会受到焊点深度、焊点直径、接触面积和点蚀情况等众多因素的影响. 其中焊点深度虽然对焊接过程中熔核生长、焊点强度等方面有着较大的影响, 但受图像采集设备和采集方法的限制, 焊点深度信息不能在压痕图像中得以展现. 因此文中只研究基于压痕图像的特征与焊点质量之间的关系. 焊点质量评价的指标一般有拉伸-剪切试验所获得的拉剪力或者剥离试验获得的熔核直径. 通常情况下, 拉伸-剪切试验结果波动较大, 因此选择熔核直径作为评价焊点质量的指标. 对拟合椭圆平均直径 d 和点蚀面积 S 分别与焊点熔核直径 D 进行相关性分析, 结果如表 4 所示. 平均轴长 d 和点蚀面积 S 与熔核直径之间呈现显著的负相关性, 相关系数均超过-0.84. 熔核直径 D 随着平均轴长 d 和点蚀面积 S 的变化

表 4 d, S 与 D 的相关系数表
Table 4 d, S and D correlation coefficient table

参数	d	S
D	-0.841	-0.884

趋势如图 8 所示. 从图 8a 中可以看出, 在焊接过程的初期, 随着平均轴长逐渐增大, 熔核直径下降较快. 这是由于在焊接初期, 电极端面直径较小、电流密度高, 造成焊接过程中飞溅严重, 焊点质量下降. 随着焊接过程的持续, 电极端面在高温高压的作用下发生塑性变形与蘑菇化, 使电极端面直径增大. 在焊接电流一定的条件下, 较大的电极端面直径会降低电极端面的电流密度, 从而影响熔核的形成, 这也造成焊点中期熔核直径减小. 随着电极端面的直径持续增大, 流经焊点中心的电流不足以熔化足够的板材, 造成焊接后期熔核直径骤降. 图 8b 展示了熔核直径随着点蚀面积的变化趋

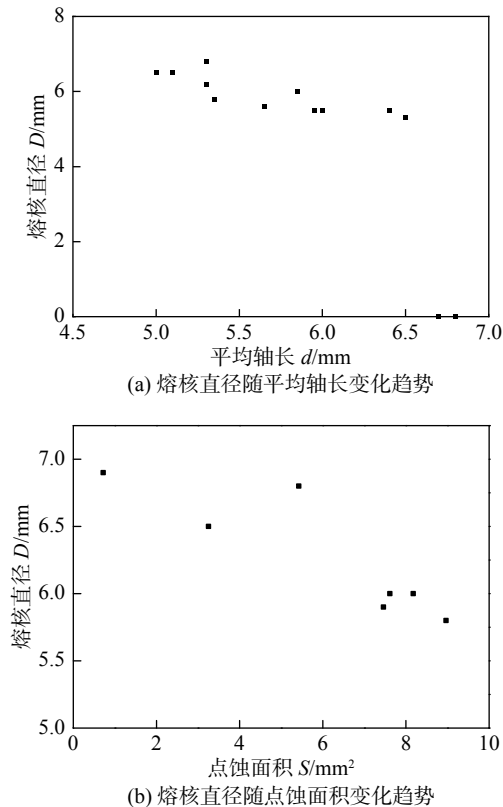


图 8 熔核直径随各特征参数变化趋势

Fig. 8 Nugget diameter changes with various characteristic parameters. (a) nugget diameter changes with the average shaft length; (b) nugget diameter changes with pitting area

势,随着点蚀面积的增加,熔核直径呈现逐渐减小的趋势,且曲线斜率增大.在焊接初期,电极头表面比较平滑,电极与工件接触面积大,熔核形成比较稳定.随着焊接过程的进行,电极表面会与镀锌钢板表面的锌层发生合金化,合金在飞溅的作用下离开电极,造成电极表面凹陷,形成点蚀.点蚀面积较小时,对焊点熔核的影响较小,熔核直径变化较为平缓.随着点蚀面积的扩大,点蚀的分流作用显著,并且大面积的点蚀改变了电极、工件之间的实际接触面积,造成熔核直径迅速下降.

4 结论

(1) 根据电极压痕的图像特征,提出了适用于压痕边缘检测与特征提取的简化算法,并且利用椭圆拟合的方法提取表征焊点质量的特征参数.

(2) 针对边缘完整的压痕轮廓,椭圆拟合轮廓与实际轮廓误差在 3.1% 以内,拟合结果能够较为准确的替代实际轮廓.对于边缘不完整的轮廓,椭圆拟合方法能够近似复原压痕轮廓.

(3) 平均轴长和点蚀面积与焊点熔核直径之间有明显的负相关性.随着焊接过程的进行,平均轴长与点蚀面积均逐渐增大,焊点熔核直径呈现逐渐降低的趋势.

参考文献

- [1] 张旭强, 陈关龙, 张延松. 热镀锌高强钢点焊的电极磨损机理分析 [J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 41 - 43.
Zhang Xuqiang, Chen Guanlong, Zhang Yansong. Experimental study on electrode wear mechanism in resistance spot welding of high strength hot galvanization steels[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(11): 41 - 43.
- [2] 张旭强, 张延松, 刘衍聪. 热镀锌高强钢点焊的电极磨损对焊点质量的影响 [J]. 焊接学报, 2009, 30(10): 5 - 8.
Zhang Xuqiang, Zhang Yansong, Liu Yancong. Effects of electrode wear on weld quality of hot galvanization steel with high strength in resistance spot welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(10): 5 - 8.
- [3] 石强, 张旭强, 孔祥顺, 等. 点蚀对镀锌高强钢点焊熔核形成的影响 [J]. 电焊机, 2017, 47(2): 5 - 8.
Shi Qiang, Zhang Xuqiang, Kong Xiangshun, *et al.* Effect of electrode pitting on nugget formation in resistance spot welding of galvanization high strength steel[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(2): 5 - 8.
- [4] Manladan S M, Yusof F, Ramesh S, *et al.* A review on resistance spot welding of aluminum alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(1-4): 605 - 634.
- [5] Rout A, Deepak B, Biswal B B, *et al.* An optimal image processing method for simultaneous detection of weld seam position and weld gap in robotic arc welding[J]. International Journal of Manufacturing, Materials and Mechanical Engineering (IJMME), 2018, 8(1): 37 - 53.
- [6] 于英飞, 朱志明, 孙博文, 等. 焊接电弧图像的边缘检测及其批处理算法 [J]. 焊接学报, 2018, 39(10): 17 - 21.
Yu Yingfei, Zhu Zhiming, Sun Bowen, *et al.* Edges detection and batch algorithm for welding arc images[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(10): 17 - 21.
- [7] 李乐乐. 镁合金逆变电阻点焊电极失效研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2016.
Li Lele. Research on the electrode failure in inverter resistance spot welding of magnesium alloy [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2016.