

基于结构负载声发射信号检测的镀锌钢板 电阻点焊飞溅主控因素分析

罗 怡^{1,2}, 朱 洋^{1,2}, 万 瑞^{1,2}, 谢小健^{1,2*}

(1. 重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054;

2. 重庆市特种焊接材料与技术高校工程研究中心, 重庆 400054)

摘 要: 利用实时监测结构负载声发射信号实现了镀锌钢板电阻点焊过程中的飞溅现象的检测。以焊接飞溅声发射事件的正峰值和振铃计数为考核指标,通过正交试验设计法设计焊接试验和方差分析法进行显著性检验,研究了镀锌钢板电阻点焊飞溅的主控因素。结果表明,焊接飞溅释放出的能量当量可由其声发射事件的正峰值和振铃计数两个特征参数定量评估。影响焊接飞溅的主要因素为焊接电流和电极力,而焊接电流所起的作用比电极力更为重要。焊接时间和焊接电流与电极力的交互作用对焊接飞溅的影响相差不大。焊接电流和焊接时间越大,焊接飞溅当量越大;电极力越大,焊接飞溅当量越小。

关键词: 电阻点焊; 镀锌钢板; 焊接飞溅; 声发射; 正交试验设计

中图分类号: TG 442 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)01-0085-05

0 序 言

电阻点焊是一种广泛应用于汽车制造的焊接工艺方法。而焊接飞溅是在电阻点焊过程中常见的物理现象,当熔核生长过快,以至于电极力不足以压制由于熔核体积迅速膨胀而产生的压力时,便产生了熔核中液态金属的飞溅^[1]。它破坏了工件的表面状态,恶化了焊接工作环境条件,也在一定程度上影响了焊点的有效承载能力^[2]。

焊接飞溅是一种较为复杂的工艺问题,尤其是在镀锌钢板的电阻点焊中,由于镀锌层熔点较低,使飞溅更容易产生。因此,对焊接飞溅进行检测和定量评估,进而分析引发飞溅的主导因素显得非常必要。在电阻点焊过程中,已经有许多信号参数被用于焊接过程的监控,最常使用的包括:焊接电流、电压、电极力、动态电阻、电极位移和可听声波信号^[3,4]。上述成功的监测方法中,一部分也是同样适用于焊接飞溅的检测的。例如,Farson 等人^[1]引入对焊接过程中电压、电极位移和电极力的监测以检测小规模电阻点焊生产中的焊接飞溅。Primoz 等

人^[5]认为电极力信号是最重要的焊接飞溅的检测指标,而被应用于不同材料电阻点焊的飞溅检测。在文献^[6,7]中,对电阻点焊过程中的声音特征信号的提取技术以及分析技术均进行了有益的探索,使得包含形核信息的声音特征信号可以从噪声信号中分离出来,并且被用于区分不同的熔核状态及焊点质量信息。

在文中,提出利用结构负载声发射信号检测镀锌钢板电阻点焊过程中的飞溅信息,并通过正交试验、方差分析等方法定量分析评估引发飞溅的主导因素。

1 试验方法

电阻点焊过程结构负载声发射信号的检测可依靠压电传感器与电极或焊接件的直接接触形成的结构负载作为传声介质,如图1所示,使焊接过程的声发射信号损失小,传感方式对于焊接飞溅的检测可以获得足够的灵敏度^[8]。

焊接试验中采用的材料为1 mm厚镀锌钢板,试样尺寸为100 mm×25 mm,焊接时搭接重合25 mm,如图2所示。试验采用的焊接设备为YR-A05CM2型交流电阻点焊机,电极材料选用铬锆铜合金(CuCrZr),圆锥台型电极端面尺寸为直径8 mm。焊接中,使用的压电传感器谐振频率为150 kHz,检测到的声发射信号传输到计算机进行进一步的分析和处理。

收稿日期: 2014-05-12

基金项目: 重庆市教委科学技术研究资助项目(KJ1400930);重庆市高等学校青年骨干教师资助计划,特种焊接材料与技术重庆市高校工程研究中心开放课题基金资助项目(SWM-T201501)

* 参加此项研究工作的还有韩静涛,朱 亮

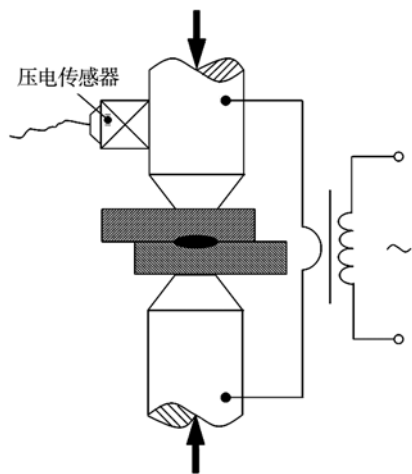


图 1 结构负载声发射信号传感示意图
Fig. 1 Diagram of acoustic emission (AE) signals sensing

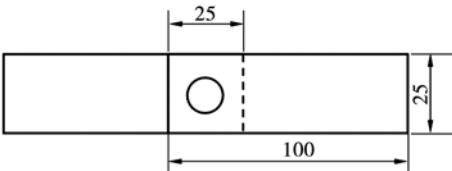


图 2 试样尺寸 (mm)
Fig. 2 Specimen specification

2 正交试验设计

采用正交试验设计方法,考虑的因素包括 3 个焊接参数和它们的 3 个交互作用,3 个焊接参数为焊接电流(A)、焊接时间(B)、电极力(C),3 个交互作用为:焊接电流与焊接时间的交互作用($A \times B$)、焊接电流与电极力的交互作用($A \times C$)、焊接时间与电极力的交互作用($B \times C$)。在试验设计过程中,交互作用被视为独立的因素参与设计与计算。表 1 为因素水平表,三个焊接参数均选择两个水平,进行等水平试验。试验选用的正交表为 L8(27)。试验方案设计如表 2 所示。表 2 中显示了 8 种试验参数的组合。在试验中,每种组合重复进行 20 次试验,以统计同一焊接参数匹配下的飞溅变化以及平均飞溅当量。试验结果同样记录于表 2 中。

表 1 因素水平表			
Table 1 Factors and levels used in experiment			
水平	焊接电流(A) <i>I/A</i>	焊接时间(B) <i>t/s</i>	电极力(C) <i>F/kN</i>
1	11 000	0.12	3.0
2	13 000	0.16	4.6

3 结果与讨论

3.1 焊接飞溅的表征

电阻点焊过程的飞溅既是熔核液态金属喷出的一种物理现象,也是过多的焊接能量的瞬间释放,这种能量的释放以焊件结构和电极结构为传输媒介,以弹性波的形式表现出来。而电阻点焊的各个物理阶段,均有相应的弹性波能量释放,结构负载声发射就是这种弹性波能量的一种表现形式。于是,在飞溅发生的熔核形核过程中,对该过程的结构负载声发射信号进行监测是检测焊接飞溅的一种可行的方法。

图 3 显示了 1 mm 厚镀锌钢板电阻点焊过程各个物理阶段的声发射信号波形特征。可以看出,电阻点焊的 3 个基本物理阶段在声发射信号波形中均得到了清晰的体现,包括:电极加载,熔核形核,电极卸载。在电阻点焊过程的声发射信号中,这 3 个物理阶段均以声发射事件来定义,即电极加载事件、熔核形核事件、电极卸载事件。飞溅通常都发生在熔核形核过程中短暂的一瞬间,其弹性波能量的释放也是瞬时的,且远高于熔核形核释放的弹性波能量。因此,可以从图 3 中所示电阻点焊的形核过程所对应的声发射熔核形核事件中找到飞溅信号的存在,这里称其为飞溅事件。可见,利用对电阻点焊过程中的结构负载声发射信号监测,可以检测到焊接飞溅发生的特征。

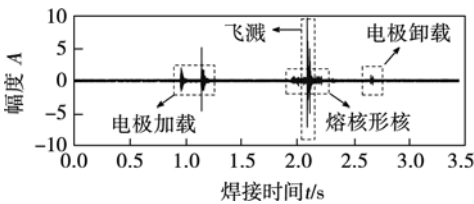


图 3 镀锌钢板电阻点焊过程的声发射信号波形
Fig. 3 AE signals of whole welding process for weld nugget formation with expulsion

为了分析焊接飞溅信号的波形特征,引入两种用于描述声发射事件的特征参数:声发射的振铃计数与正峰值。如图 4 所示,将焊接飞溅声发射信号提取出来,显然,焊接飞溅事件由若干脉冲信号组成。针对焊接飞溅的强度,设定一个门限值。在焊接飞溅事件中,幅值高于设定门限值的声发射脉冲的总数即为声发射振铃计数,这里用 N 表示。在焊接飞溅事件中,高于设定门限值的最大幅值即为声发射正峰值,这里用 M 表示。焊接飞溅事件的声发射

振铃计数和正峰值越大,说明焊接飞溅的强度越大,即焊接飞溅的能量当量越大;反之,则说明焊接飞溅的强度越小,即焊接飞溅的能量当量越小. 可见,利用声发射事件的特征参数:振铃计数和正峰值,可以对焊接飞溅的能量当量进行定量评估. 在文中,考虑到检测灵敏度以及根据大量对焊接过程的统计分析,设定焊接飞溅声发射事件的门限值为 4.5,事件幅值一旦高于 4.5 即认为在焊接过程中发生了飞溅.

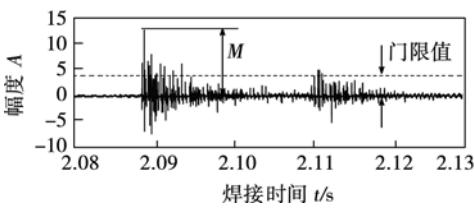


图 4 声发射飞溅事件的特征参数示意图
Fig. 4 Schematic diagram of characteristic parameters in explosion event of AE

以声发射焊接飞溅事件的正峰值 M 和振铃计数 N 为试验考核指标进行 3 因素 2 水平正交试验的结果如表 2 所示. 其后的方差分析即利用 M, N 两个指标值进行计算,而焊接飞溅主控因素的显著性判断也基于这两个指标.

表 2 试验方案及试验结果					
Table 2 Experiment scheme and results					
序号	焊接电流 I/A	焊接时间 t/s	电极力 F/kN	M 值	N 值
1	11 000	0.12	3.0	6.60	27.5
2	11 000	0.12	4.6	5.12	15.5
3	11 000	0.16	3.0	7.27	31.4
4	11 000	0.16	4.6	5.72	18.5
5	13 000	0.12	3.0	6.91	30.4
6	13 000	0.12	4.6	6.61	26.7
7	13 000	0.16	3.0	7.61	33.9
8	13 000	0.16	4.6	7.36	32.7

3.2 因素的显著性分析

利用方差分析对焊接飞溅的主控因素进行进一步的分析,其中, F 检验法用于因素显著性的判断. 对两个考核指标 M 值和 N 值的方差分析表如表 3 和表 4 所示,其中,对焊接飞溅影响非常显著的因素用两个“*”标识,没有该标识的因素为对焊接飞溅影响不显著,即可以忽略不计的因素. 可见,两个考核指标的方差分析表体现出了同一个因素显著性结果,即对焊接飞溅有非常显著的影响的因素是:焊接

电流(A)、焊接时间(B)、电极力(C)和焊接电流与电极力的交互作用($A \times C$). 其余因素对焊接飞溅的影响均为不显著.

表 3 M 值方差分析表					
Table 3 Analysis of variance to M value					
差异源	离差平方和 σ_{SS}	自由度 f	均方 σ_{MS}	统计量 F	显著性
A	1.786	1	1.786	893.0	* *
B	0.925	1	0.925	462.5	* *
C	1.602	1	1.602	801.0	* *
$A \times B$	0.004	1	0.004	2.0	
$A \times C$	0.769	1	0.769	384.5	* *
$B \times C$	0.000 05	1	0.000 05	0.025	
误差	0.002	1	0.002		
总和	5.088	7			

表 4 N 值方差分析表					
Table 4 Analysis of variance to N value					
差异源	离差平方和 σ_{SS}	自由度 f	均方 σ_{MS}	统计量 F	显著性
A	118.58	1	118.58	82.35	* *
B	33.62	1	33.62	23.35	* *
C	111.01	1	111.01	77.09	* *
$A \times B$	0.85	1	0.85	0.59	
$A \times C$	50.00	1	50.00	34.72	* *
$B \times C$	0.32	1	0.32	0.22	
误差	1.44	1	1.44		
总和	315.82	7			

利用方差分析表中各因素对应计算出 F 值大小,也可以对影响焊接飞溅的主控因素的主次顺序进行排序. 因素对应的 F 值越大,说明该因素对焊接飞溅的影响越大. 由 M 值方差分析表 3 可得,影响焊接飞溅的主控因素的主次顺序为:焊接电流(A) > 电极力(C) > 焊接时间(B) > 焊接电流与电极力的交互作用($A \times C$);由 N 值方差分析表 4 可得,影响焊接飞溅的主控因素的主次顺序为:焊接电流(A) > 电极力(C) > 焊接电流与电极力的交互作用($A \times C$) > 焊接时间(B). 由上述主次顺序可以判断,影响焊接飞溅的最主要因素为焊接电流和电极力两个焊接参数,焊接时间和焊接电流与电极力的交互作用对焊接飞溅的影响相差不大. 因此,为了避免焊接飞溅,两方面的措施必不可少:其一为控制焊接电流和电极力;其二为对焊接时间和焊接电流与电极力的匹配给予足够的关注. 根据上述显著性分析结果,以下对各焊接参数对焊接飞溅的影响规律作进一步分析.

3.3 焊接参数对飞溅的影响

熔化材料形成熔核的焊接能量主要由焊接参数

控制,因此,焊接参数是引发焊接飞溅的主控因素. 分别改变焊接电流、焊接时间、电极力三个参数进行焊接试验,并对焊接过程中的飞溅声发射信号进行检测. 利用声发射振铃计数 N 和正峰值 M 对焊接飞溅的当量进行描述,如图 5~图 7 所示. 图 5 为焊接电流对焊接飞溅的影响. 可以看出,随着焊接电流由 9 kA 增大到 14 kA,焊接飞溅事件的声发射振铃计数和正峰值均呈上升趋势. 这表明,在其它焊接参数一定的情况下,焊接电流越大,在通电瞬时提供的焊接能量越多,则正在形核的熔核金属的体积膨胀越迅速,使焊接飞溅当量越大. 图 6 为焊接时间对焊接飞溅的影响. 可以看出,随着焊接时间由 0.12 s 增大到 0.18 s,焊接飞溅事件的声发射振铃

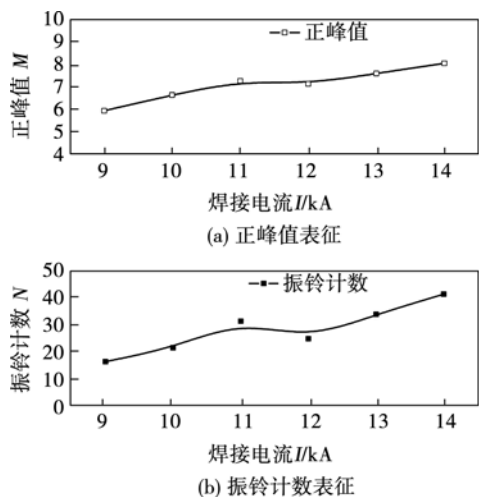


图 5 焊接电流对飞溅当量的影响

Fig. 5 Influence of welding current on equivalent weight of expulsion

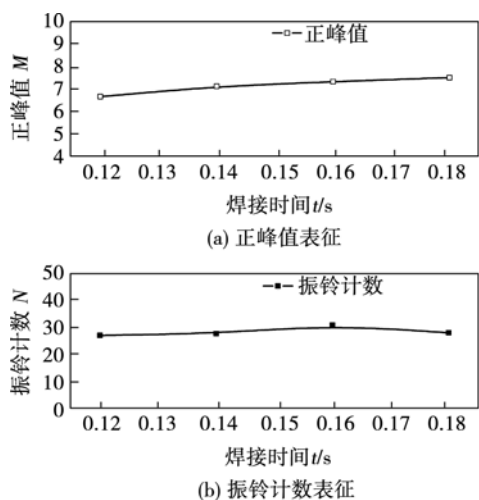


图 6 焊接时间对飞溅当量的影响

Fig. 6 Influence of welding time on equivalent weight of expulsion

计数和正峰值同样均呈上升趋势. 这表明,在其它焊接参数一定的情况下,焊接时间越大,富余的焊接能量越多,使熔核金属的体积迅速膨胀产生飞溅,且焊接飞溅当量越大. 图 7 为电极力对焊接飞溅的影响. 可以看出,在其它焊接参数一定的情况下,随着电极力由 2.0 kN 增大到 4.6 kN,焊接飞溅事件的声发射振铃计数和正峰值均呈下降趋势. 这表明,电极力越大,电极力对正在形核的熔核熔融金属的体积膨胀的压制作用越大,从而使焊接飞溅当量越小.

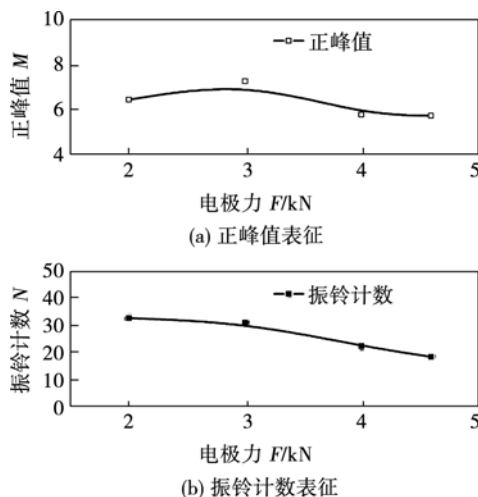


图 7 电极力对飞溅当量的影响

Fig. 7 Influence of electrode pressure on equivalent weight of expulsion

由图 5~图 7 还可以看出,焊接电流和电极力引发的飞溅当量变化比焊接时间引发的飞溅当量变化要显著得多. 由此结合上述因素的显著性分析可以判断,在镀锌钢板的电阻点焊中,作为引发焊接飞溅的主要因素,焊接电流和电极力所起的作用应该比焊接时间更为重要. 当然,三者之间的合理匹配同样对焊接飞溅的控制至关重要.

4 结 论

(1) 在镀锌钢板电阻点焊中,监测焊接过程中的结构负载声发射信号可对焊接飞溅进行检测. 焊接飞溅释放出的能量当量可由焊接飞溅声发射事件的正峰值和振铃计数两个特征参数进行定量评估.

(2) 影响焊接飞溅的主要因素为焊接电流和电极力,而焊接电流在引发飞溅中所起的作用比电极力更为重要. 焊接时间和焊接电流与电极力的交互作用对焊接飞溅的影响相差不大.

(3) 焊接电流和焊接时间越大,焊接飞溅当量越大;电极力越大,焊接飞溅当量越小. 为了控制焊

接飞溅,首先需要控制焊接电流和电极力,其次需要对焊接时间和焊接电流与电极力的匹配给予足够的关注。

参考文献:

- [1] Farson D F, Chen J Z, Ely K, *et al.* Monitoring of expulsion in small scale resistance spot welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2003, 8(6): 431–436.
- [2] Pouranvari M, Abedi A, Marashi P, *et al.* Effect of expulsion on peak load and energy absorption of low carbon steel resistance spot welds[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(1): 39–43.
- [3] 文 静,王春生,徐国成,等. 不锈钢电阻点焊过程中的动态电阻变化规律分析[J]. *焊接学报*, 2008, 29(11): 69–72.
Wen Jing, Wang Chunsheng, Xu Guocheng, *et al.* Analysis on dynamic resistance in resistance spot welding of stainless steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(11): 69–72.
- [4] Primoz P, Ivan P, Janez D, *et al.* Estimating the strength of resistance spot welds based on sonic emission[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, 10(4): 399–405.
- [5] Primoz P, Ivan P, Janez D, *et al.* Expulsion detection system for resistance spot welding based on a neural network[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15: 592–598.
- [6] 步贤政,单 平,罗 震,等. 基于独立分量分析的点焊特征声音信号提取[J]. *焊接学报*, 2009, 30(2): 41–44.
Bu Xianzheng, Shan Ping, Luo Zhen, *et al.* Characteristic extraction of acoustic signals emitted from resistance spot welding process based on independent component analysis[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(2): 41–44.
- [7] 王耀文,陈摇强,孙振国,等. 等离子弧焊接穿孔行为的声信号传感[J]. *机械工程学报*, 2001, 37(1): 53–56.
Wang Yaowen, Chen Yaoqiang, Sun Zhenguo, *et al.* Sound sensing of the keyhole behaviors in plasma arc welding[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2001, 37(1): 53–56.
- [8] 罗 怡,朱成华,李京龙. 电阻点焊熔核形核信息的声发射信号表征[J]. *焊接学报*, 2013, 34(7): 77–80.
Luo Yi, Zhu Chenghua, Li Jinglong. Characterization of nugget nucleation information by acoustic emission signals during resistance spot welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(7): 77–80.

作者简介: 罗 怡,男,1979年出生,博士,教授. 主要从事先进焊接技术与工艺方面的教学和科研工作,发表论文70余篇. Email: luoyi@cqut.edu.cn