

胶接点焊接头拉伸声发射信号分析及其损伤模型

赵君乾 曾凯 刑保英 王凯伟 易金权

(昆明理工大学, 机电工程学院, 云南省先进装备智能制造技术重点实验室, 昆明 650500)

文 摘 基于 Box - Behnken Design 响应面法开展胶接点焊工艺试验, 分别采集了胶接点焊、点焊、粘接三种接头拉伸过程的声发射信号, 采用小波包对信号进行分解重构, 分析了三种接头的信号特征, 同时结合撞击计数历程图对焊核失效断口进行了分析, 并通过累计撞击计数建立了试件的损伤模型。结果表明: 三种接头在屈服阶段和断裂阶段的声发射信号较为丰富; 胶层失效和焊核拔出失效可以通过声发射信号特征进行区分, 其中胶层失效时其声发射信号频率主要集中在 0~62.5 kHz, 焊核拔出失效时其声发射信号频率主要集中在 31.25~281.25 kHz; 声发射撞击计数历程图可以从总体上反映焊核失效过程; 建立的损伤模型可以较好地表征试件损伤状态。

关键词 胶接点焊, 声发射, 小波包, 响应面

中图分类号: TG407

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.01.011

Analysis of Acoustic Emission Signal in The Tensile Process of Weld-bonding Joint and Its Damage Model

ZHAO Junqian ZENG Kai XING Baoying WANG Kaiwei YI Jinqian

(Yunnan Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology for Advanced Equipment, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

Abstract The weld-bonding test was carried out based on Box-Behnken Design response surface method, the acoustic emission signals in the stretching process of weld-bonding, spot-welding and adhesive joints were collected, and the signal was decomposed and reconstructed by wavelet packet. The weld nugget failure fracture was analyzed based on the hits history diagram, and the damage models of three kinds of joints were established through the cumulative hits. The results show that the three types of joints have abundant acoustic emission signals in the yield stage and fracture stage. Adhesive layer failure and weld nugget failure can be distinguished by acoustic emission signal characteristics. And the failure frequency of the adhesive layer is mainly concentrated in 0 to 62.5 kHz. When the weld nugget fails, the frequency is mainly concentrated in 31.25 to 281.25 kHz. The acoustic emission hits history diagram can reflect the failure process of the nugget on the whole. The established damage model can better characterize the damage state of the specimen.

Key words Weld-bonding, Acoustic emission, Wavelet packet, Response surface

0 引言

汽车轻量化是当今汽车制造业关注的热点, 而高强钢已成为一种汽车轻量化广泛使用的材料。胶接点焊是一种将胶接和点焊技术相结合的复合连接技术, 其连接节点具有胶接和点焊的结构特征, 既改善了接头的应力集中又提升了疲劳性能, 在汽车制

造领域得到了广泛的应用^[1-2]。

声发射技术是利用材料内部损伤释放应力波这一物理效应来实现对材料的无损检测。目前, 声发射技术在焊接领域已经得到了广泛的应用。刘同成等^[3]针对 5052 铝合金板材进行拉伸试验, 借助 ARAMIS 应变测量系统和声发射信号采集系统分析了板材拉伸过程

收稿日期: 2021-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51565022)

第一作者简介: 赵君乾, 1996 年出生, 硕士研究生, 主要从事薄板材料连接新技术的研究工作。E-mail: zjqxhxq@163.com

的演变规律。张颖等^[4]结合声发射试验与 ABAQUS 有限元仿真进行 Q345 试件的损伤分析,发现声发射累积撞击计数能够很好的反映拉伸过程的不同损伤阶段。周伟等^[5]研究了单搭长度对胶焊接头损伤声发射信号的影响,结果表明,随着搭接长度的增加接头的边缘应力集中越明显,导致声发射信号增多,累计的撞击计数增加。益小苏^[6]对不同黏接剂的胶接接头进行微损伤声发射研究,给出了微损伤的特征值,同时提出了胶接接头的强度设计准则。DROUBI 等^[7]利用声发射技术对不同焊接缺陷试样进行检测,发现通过声发射特征参数的能量、峰值和均方根值能够识别碳钢的焊接缺陷。罗怡等^[8-11]基于结构负载声发射信号研究电阻点焊过程的熔核形核信号的时频表征,发现声发射信号可实现对电阻点焊熔核形核过程进行在线监测,评估焊接飞溅的主导因素及飞溅的能量当量,为研究熔滴过渡模式探索了可行途径。HERBELOT 等^[12]利用声发射事件的能量对 FSW 接头拉伸过程进行了研究,发现声发射信号能够确定试件损伤特征。综上所述,国内外学者已将声发射技术应用于板材拉伸、焊接过程及损伤判定等方面,但鲜有利用声发射技术研究胶接点焊拉伸过程以探究其断裂过程的报道。

本文采集胶接点焊接头拉伸过程的声发射信号,利用小波包对信号进行分析处理得到拉伸各阶段的声发射信号时频域特征,同时与点焊接头和粘接接头信号特征进行对比,对胶层失效和焊核拔出失效进行了区分,利用累计撞击计数建立接头的损伤模型,最后结合撞击计数历程图对焊核失效部位微观形貌进行了分析。

1 试验

1.1 接头制备及试验参数的获取

试件的材料为 DP780 双相钢,黏接剂为环氧树脂 (DP460)。试件的尺寸为 110 mm×25 mm×1.2 mm,单搭接头试样尺寸为 25 mm×25 mm。试件及搭接尺寸如图 1 所示。试件焊接前先用砂纸对焊接面进行打磨,再用酒精去除焊接面的污渍,然后将胶层均匀地涂抹于焊接面,通过夹具将胶层的厚度控制为 0.2 mm。采用中频逆变式直流点焊机对试件进行点焊,然后将试件放入恒温箱固化 24 h。

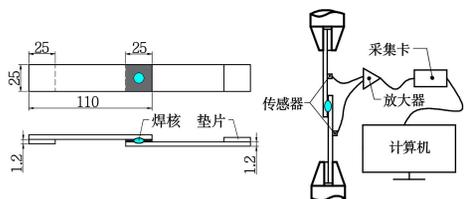


图 1 试件的尺寸及拉伸示意图

Fig. 1 The size and tensile diagram of the specimen

采用 MTS 电液伺服材料试验机对三种试件进行拉剪试验,拉伸速率设置为 5 mm/min。为减小在拉伸过程中产生的附加扭矩,分别在试件的两端粘贴规格为 25 mm×25 mm×1.2 mm 的垫片。声发射信号采集系统主要构成为 PCI-2 数据采集卡、AEwin 前置放大器、R15α 声发射传感器、计算机、声发射数据采集分析软件。根据相关文献以及预试验结果设定峰值鉴别时间 (PDT) 0.2 ms、撞击鉴别时间 (HDT) 0.8 ms、撞击闭锁时间 (HLT) 1 ms、采样率频率 1 MHz,信号采集触发阈值 80 dB。在拉伸时两个传感器固定于距焊核等距离处,同时传感器与试件之间添加耦合剂以降低声发射信号的损失。

1.2 试验设计

采用中心组合试验设计方法 BBD (Box-Behnken Design) 进行试验设计。BBD 试验设计方法通过选取不同的因素和不同的水平编排试验,以多元非线性回归方程对试验数据拟合以达到寻优的目的^[13]。本文以胶接点焊接头的失效载荷、熔核直径和能量吸收值为目标量,以焊接电流、焊接时间、电极压力三因素为工艺参数建立回归模型,如表 1 所示。为避免偶然误差,每组焊接参数下进行三次胶接点焊试验。同时采用失效模式为焊核拔出的胶接点焊试件的焊接参数作为输入参数进行点焊试验制备点焊试件,并制备了 2 组粘接试件。

表 1 因素范围及水平表

Tab. 1 Factor levels of welding parameters

水平编码	焊接电流/kA	焊接时间/ms	电极压力/MPa
-1	7	100	0.3
0	8	125	0.35
1	9	150	0.4

2 结果分析

2.1 接头声发射信号时频域特征

使用小波包对三种试件拉伸过程采集到的声发射信号进行处理,采用 dB4 小波基进行 4 层分解后按频率大小进行重构,同时对信号归一化能量进行分析。小波包分解 4 层后共有 16 个频带,每个频带的带宽是 31.25 kHz,如表 2 所示。对于胶接点焊和点焊试件,本文只分析了失效模式为焊核拔出的接头的声发射信号。

在拉伸过程中,胶接点焊接头开始主要由胶层承载,胶层失效后由焊核单独承载,点焊接头由焊核承载,粘接接头由胶层承载。在弹性阶段接头都没有声发射信号出现,这是由于在弹性阶段当载荷去除后试件的变形可以恢复,因此没有应变能的释放,

表2 频率层对应频率分布

Tab. 2 The frequency distribution of the frequency bands

频率层	频率分布/kHz	频率层	频率分布/kHz
1	0.00 ~ 31.25	9	250.00 ~ 281.25
2	31.25 ~ 62.50	10	281.25 ~ 312.50
3	62.50 ~ 93.75	11	312.50 ~ 343.75
4	93.75 ~ 125.00	12	343.75 ~ 375.00
5	125.00 ~ 156.25	13	375.00 ~ 406.25
6	156.25 ~ 187.50	14	406.25 ~ 437.50
7	187.50 ~ 218.75	15	437.50 ~ 468.75
8	218.75 ~ 250.00	16	468.75 ~ 500.00

也就没有声发射信号的产生。随着载荷的增加,试件产生塑性变形进入屈服阶段,开始接收到声发射信号。在屈服阶段,胶焊接头的声发射信号频率主要集中在218.75~250 kHz(对应第8频率层,下同),点焊接头的声发射信号频率主要集中在93.75~187.5 kHz(4~6),粘接接头的声发射信号频率主要集中在125~218.75 kHz(5~7),如图2所示。此时,胶接头和粘接接头都是由胶层承载,但二者信号频率差异较大,这是胶接头在焊接时胶层气化破坏了胶层结构导致的。当进入强化阶段时,此时试件内部晶体滑移阻塞严重,声发射信号数量稀少。

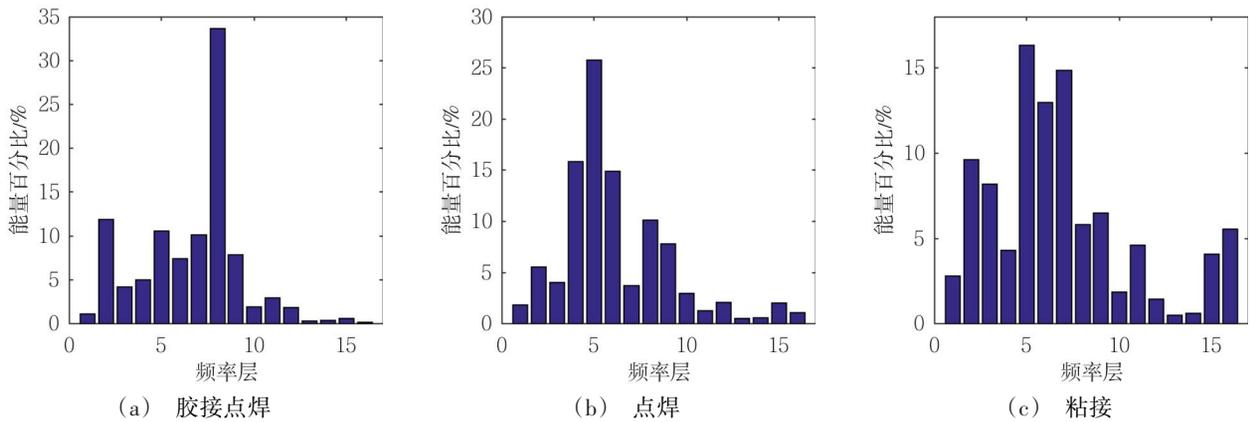


图2 三种接头屈服阶段能量分布图

Fig. 2 Energy distribution diagrams of three kinds of joints at yield stage

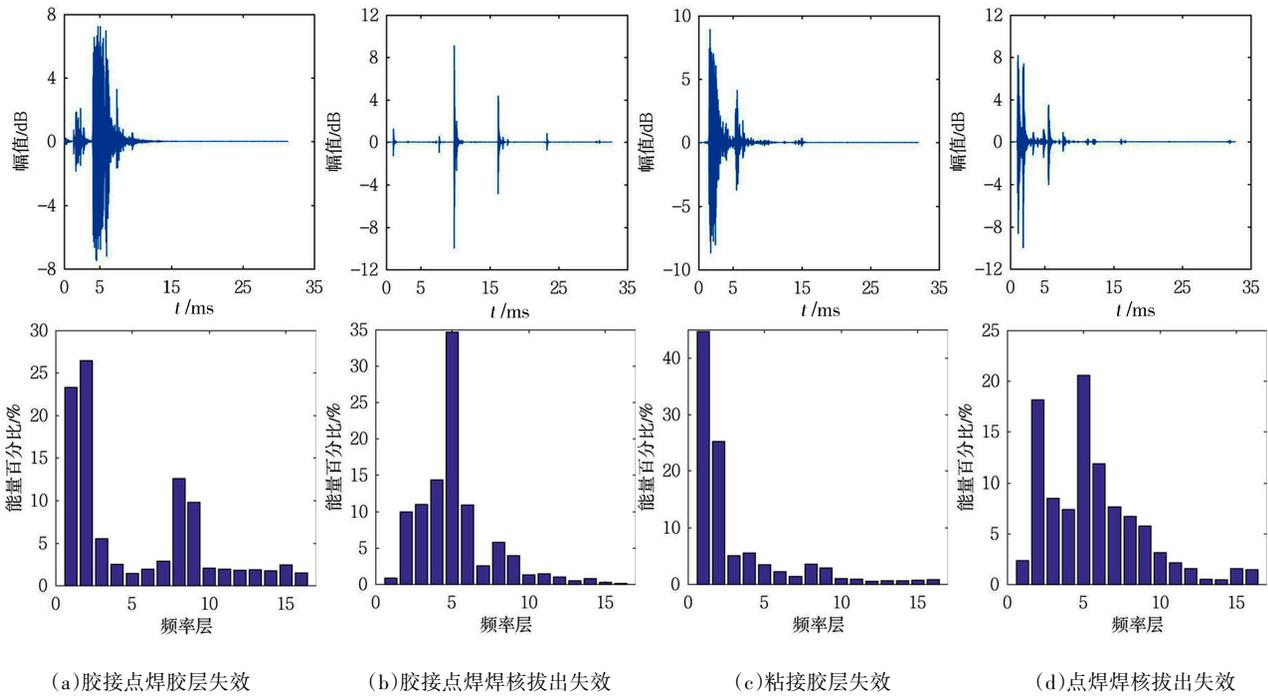


图3 三种接头失效时域图及能量分布图

Fig. 3 Time domain diagrams and energy distribution diagrams of three kinds of joint at the failure moment

如图3所示,对比胶接头和粘接接头胶层失效瞬间能量分布图可以看出二者声发射信号在0~

62.5 kHz(1~2)都具有较高的能量占比,这说明胶层失效时频率主要集中在这一频段,但胶接点焊在第

8、9频段也具有较高的能量占比,这是由于胶层失效瞬间焊核受到载荷作用,其内部的一部分应变能得到了释放。

从图3可以看出胶焊接头与点焊接头二者声发射信号在31.25~218.75 kHz(2~7)都具有较高的能量占比,而点焊接头声发射信号在218.75~281.25 kHz(8~9)的能量占比要高于胶焊接头,这与胶焊接头和粘接接头胶层失效时的差异频段(8~9)一致,这也印证了胶层失效时焊核受损这一说法。焊核失效时其声发射信号频率主要集中在31.25~281.25 kHz(2~9)。

2.2 接头损伤模型的建立

损伤模型的建立可以评估试件的损伤状态进而判断试件的安全状况。为了更好地描述试件地损伤状态则需要引入损伤变量,损伤变量需要有明确的物理意义来反映试件微观结构的损伤同时要便于测

量和计算分析,声发射特征参数刚好满足要求。评定时常用损伤因子 D 代表材料的受损程度,用公式 $D=N/N_0$ 表示, N_0 为到达最大失效载荷时的累积撞击计数, N 为某一时刻对应载荷下的累积撞击计数。当 $D=0$ 时表明试件无损伤, $D=1$ 时表明试件严重受损。经过多次拟合发现Gaussian函数拟合结果与试验值更相近,因此采用Gaussian函数对累计撞击计数和失效载荷进行拟合,拟合公式如式(1)和式(2)所示,式中 x 为试件拉伸过程中所受载荷值, a 、 b 、 c 为常数,与试件的受力状态和材料有关。拟合结果如表3所示,其中Z、DH、JH分别代表粘接接头、点焊接头和胶焊接头。

$$N = a \times \exp\left[-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right] \quad (1)$$

$$D = \frac{N}{N_0} = \frac{a \times \exp\left[-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right]}{N_0} \quad (2)$$

表3 三种接头的Gaussian函数拟合结果

Tab. 3 Gaussian function fitting results of three kinds of joints

模型	试件	参数名称			相关系数(R)	断裂方式
		a	b	c		
载荷-累积撞击计数	Z1	18 270	15.99	7.120	0.990 7	界面撕裂
	DH1-2	17 670	8.89	1.490	0.949 0	界面撕裂
	DH14-1	32 920	13.33	1.803	0.963 9	焊核拔出
	JH1-2	29 930	17.71	4.335	0.995 5	界面撕裂
	JH6-2	40 710	17.61	2.260	0.999 7	焊核拔出
	JH10-1	17 540	23.10	3.980	0.872 6	焊核拔出

随机选取一个模型进行验证。由上述推导可以得出胶接点焊接头JH1-2的损伤模型,制备试件的工艺参数和拉伸过程的试验条件不变,计算试件不同载荷下累积撞击计数进而得出损伤因子,试验中对应的载

荷分别是11.3 kN, 12 kN, 12.8 kN, 13.8 kN, 16.4 kN, 结果如表4所示。从表中可以看出拟合的损伤因子与试验计算的结果误差较小,说明用累计撞击计数建立的损伤模型能够较好地表征试件的损伤程度。

表4 胶焊试件的损伤因子D的试验值与拟合值

Tab. 4 Test values and fitting values of damage factor D of weld-bonding

载荷/kN	损伤模型	N_0 拟合	N_0 试验	N 拟合	N 试验	D 拟合	D 试验	误差/%
11.3	$\frac{29930 \times \exp\left[-\left(\frac{x-17.71}{4.335}\right)^2\right]}{N_0}$	27 318	27 338	3 362	3 529	0.12	0.13	7.7
12				5 280	5 003	0.19	0.183	3.8
12.8				8 298	8 782	0.30	0.32	6.3
13.8				13 268	12 891	0.49	0.47	4.3
16.4				27 318	27 338	1.00	1.00	0

2.3 焊核失效部位微观形貌分析

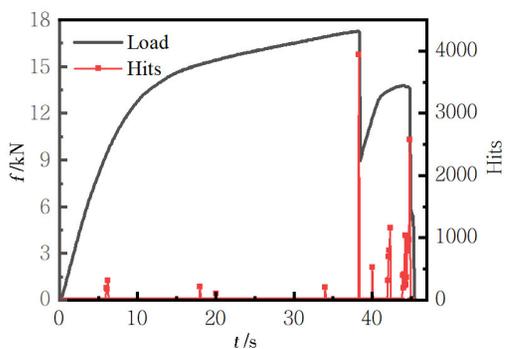
图4分别为胶焊接头、点焊接头的撞击计数历程图和焊核失效部位断口图。从断口图中可以看出两种接头在焊核失效部位都存在着大量大小不一的韧窝。韧窝的形成主要是由于材料内部空洞的长大、

集聚。在焊核受载初始阶段,材料内部分离形成微空洞。随着载荷的加大,晶体开始滑移,此时有少量声发射信号发出。在载荷不断加大并接近试件抗拉极限的过程中,大量微空洞之间的基体被撕裂从而使微空洞相连形成大的空洞,这也是韧窝形成的基

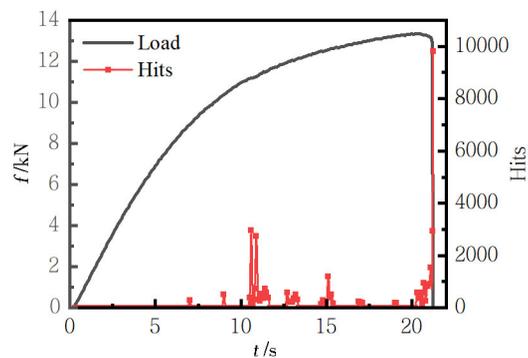
础,整个过程声发射信号也较为丰富。当载荷达到试件抗拉极限时,此时大量空洞已经形成,此时内部晶体滑移阻塞已十分严重,在载荷的作用下空洞之间的基体发生颈缩,载荷到达峰值时所有空洞之间的基体在一瞬间被拉断,形成图中所示的韧窝状断口,晶体之间的大量应变能也得到了释放,声发射信

号也最为丰富。

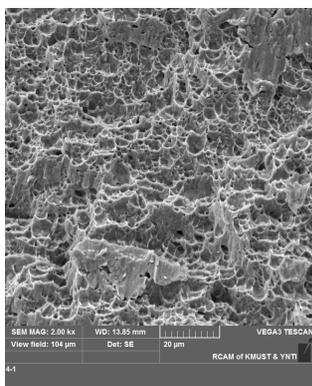
从点焊撞击计数历程图也可以看出,在拉伸开始一段时间后,出现了大量的撞击计数。焊核失效时,撞击计数值达到最大,而在拉伸开始阶段以及焊核失效前基本无撞击计数,这也与韧窝状断口形成过程分析一致。



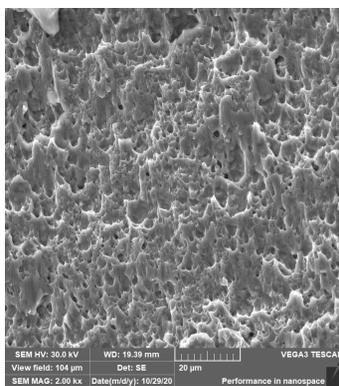
(a) 胶接点焊接头撞击计数历程图



(b) 点焊接头撞击计数历程图



(c) 胶接点焊接头焊核失效部位断口



(d) 点焊接头焊核失效部位断口

图4 撞击计数历程图及焊核失效部位断口图

Fig. 4 Hits history diagrams and nugget failure fracture morphologies of two kinds of joints

3 结论

(1) 拉伸过程中,在屈服阶段和断裂阶段声发射信号较为丰富,在屈服阶段点焊接头的声发射信号频率主要集中在 93.75~187.5 kHz,胶焊接头的声发射信号频率主要集中在 218.75~250 kHz,粘接接头的声发射信号频率主要集中在 125~218.75 kHz,造成胶焊接头和粘接接头频率差异的原因是胶焊接头焊接过程胶层气化导致胶层结构被破坏。

(2) 胶层失效时其声发射信号频率主要集中在 0~62.5 kHz,焊核拔出失效时其声发射信号频率主要集中在 31.25~281.25 kHz,因此可以从失效时的声发射信号频率对胶层失效和焊核拔出失效进行区分。

(3) 通过 Gaussian 函数建立的累计撞击计数和载荷损伤模型经试验验证误差在 10% 以内,可以较

好地表征试件的损伤状态。

参考文献

[1] 殷勇,涂善东,朱进. 胶焊单搭接头长时力学性能分析[J]. 航空材料学报, 2001, 21(3): 57-62.
 YIN Yong, TU Shandong, ZHU Jin. Long-term stress analysis of single-lap weld bonded joint [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(3): 57-62.
 [2] 孙海涛,张延松,来新民,等. 双相钢胶焊与电阻点焊接头性能对比分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(10): 17-20, 114.
 SUN Haitao, ZHANG Yansong, LAI Xinmin, et al. Comparison of joint performance between weld-bonding and resistance spot welding of dual-phase steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(10): 17-20, 114.
 [3] 刘同成,闫小青,杨志. 基于 ARAMIS 的铝合金拉伸过程声发射特性分析[J]. 南昌大学学报(工科版), 2018, 40(2): 152-157.

- LIU Tongcheng, YAN Xiaoqing, YANG Zhi. Analysis of acoustic emission characteristics of aluminum alloy stretch based on ARAMIS[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2018, 40(2): 152-157.
- [4] 张颖, 王子兴, 周俊鹏, 等. Q345 试件细观损伤的声发射量化评价实验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 40-45, 60.
- ZHANG Ying, WANG Zixing, ZHOU Junpeng, et al. Experimental study on acoustic emission quantitative assessment of Q345 specimen's mesomechanical damage [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 40-45, 60.
- [5] 周伟, 张晓霞, 韩婧, 等. 复合材料单搭接胶接头破坏声发射监测[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(3): 69-72.
- ZHOU Wei, ZHANG Xiaoxia, HAN Jing, et al. Acoustic emission monitoring for failure of adhesive-bonded single-Lap composite joints[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(3): 69-72.
- [6] 益小苏. 胶接接头的微损伤特征值和破坏过程的声发射研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1984(3): 50-63.
- YI Xiaosu. The investigation on the crazing characteristic value and breaking process of the adhesive bond with sound emission analysis [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1984(3): 50-63.
- [7] MOHAMAD G D, NADIMUL H F, FRASER O, et al. Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 134: 28-37.
- [8] LUO Yi, LI Jinlong, WU Wei. Characterization of nugget nucleation quality based on the structure-borne acoustic emission signals detected during resistance spot welding process [J]. Measurement, 2013, 46(3): 1053-1060.
- [9] 罗怡. 基于结构负载声发射检测的低碳钢板电阻点焊飞溅表征[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 150-154.
- LUO Yi. Expulsion characterization for resistance spot welding of low carbon steel based on structure-borne acoustic emission signals detection [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 150-154.
- [10] LUO Yi, WAN Rui, XIE Xiaojian, et al. Expulsion analysis of resistance spot welding on zinc-coated steel by detection of structure-borne acoustic emission signals [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(9-12): 1995-2002.
- [11] 罗怡, 谢小健, 朱洋, 等. 铝合金脉冲 MIG 焊接熔滴过渡行为的声发射信号时频域表征[J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 83-86, 91.
- LUO Yi, XIE Xiaojian, ZHU Yang, et al. Time and frequency domain analysis of metal droplet transfer by acoustic emission signals during pulse MIG welding of aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 83-86, 91.
- [12] HERBELOT C, HOANG T D, IMAD A, et al. Damage mechanisms under tension shear loading in friction stir spot welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(8): 688-693.
- [13] BOX G E P, WILSON K B. On the experimental attainment of optimum conditions [J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 1951, 13(1): 270-310.