

# 双相钢激光胶接点焊及接头强度分析

冯煜阳, 曾凯, 何晓聪, 孙鑫宇, 韦涛

昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500

**摘要** 以 1.5 mm 厚的 DP590 双相钢为母材, 将焊接时间、焊接功率、离焦量作为变量, 进行了激光胶接点焊正交试验。研究了接头内部形貌特征, 分析了焊接参数对接头静力学性能的影响规律, 并观察了接头拉剪断口形貌。结果表明, 当焊接功率为 1800 W、焊接时间为 1000 ms、离焦量为 -3 mm 时, 胶接点焊接头的平均峰值载荷最大, 为 7529.30 N; 激光胶焊接头的超声 C 扫描图像可划分为焊核区、空腔区、热影响区和胶层区, 且利用超声 C 扫图像能有效测量焊核直径; 焊接功率对接头的拉剪性能影响最大, 焊接时间次之, 离焦量最小; 不同焊接参数下的接头失效模式均为界面断裂, 焊点的断口上分布着拉长韧窝。

**关键词** 激光技术; 激光胶焊; 超声 C 扫描图像; 正交试验; 双相钢; 断口形貌

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031404

## Laser Spot Weld Bonding and Joint Strength Analysis of Dual-Phase Steels

Feng Yuyang, Zeng Kai, He Xiacong, Sun Xinyu, Wei Tao

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology,  
Kunming, Yunnan 650500, China

**Abstract** The orthogonal experiment of laser spot welding is conducted when the DP590 dual phase steel with 1.5 mm thickness is used as the base material and the welding time, the welding power and the defocusing are taken as variables. The internal morphology of the joints is studied, influences of welding parameters on the static performance of the joint are analyzed, and the morphologies of tensile shear fractures are investigated. The results show that, when the welding power is 1800 W, the welding time is 1000 ms and the defocusing is -3 mm, the average peak load of adhesively bonded spot welding joints is the maximal, which is 7529.30 N. The ultrasonic C-scan image of the laser welding joints can be divided into the nugget zone, the cavity zone, the heat-affected zone and the adhesive zone, and the ultrasonic C-scan image can be used to effectively measure the nugget diameter. The influence of the welding power on the tensile and shear properties of the joints is the maximal, that of the welding time is the second, and that of the defocusing is the minimal. With different welding parameters, the failure modes of the joints are interfacial fractures, and the elongated dimples are distributed on the fracture surface of solder joints.

**Key words** laser technique; laser weld bonding; ultrasonic C-scan image; orthogonal tests; dual-phase steel; fracture morphology

**OCIS codes** 140.3390; 140.3510; 160.3900; 350.3390

## 1 引言

汽车轻量化不仅可以减小能耗, 而且能减少尾气

排放, 已成为 21 世纪汽车技术的前沿和关注点之一<sup>[1]</sup>。用双相高强度钢取代传统的低碳钢可有效减轻汽车的重量, 达到汽车轻量化的目的<sup>[2]</sup>。汽车车身构

收稿日期: 2017-09-18; 收到修改稿日期: 2017-10-05

基金项目: 国家自然科学基金(51565022, 51565023)

作者简介: 冯煜阳(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事新型薄板材料焊接方面的研究。E-mail: kmlgfyy@163.com

导师简介: 曾凯(1976—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事新型薄板材料焊接方面的研究。

E-mail: kmzk201109@163.com(通信联系人)

件主要通过焊接的方式进行连接<sup>[3]</sup>,电阻点焊与粘接技术的结合,可以使整个接头的应力分布更加均匀,提高接头的耐疲劳性能<sup>[4]</sup>,但电阻点焊使用的胶粘剂需具有导电性,增加了成本。而激光胶焊技术对胶层无特殊要求,且具有焊接速度快、精度高、热输入量小、工件变形小等诸多优点,具有广泛的应用前景<sup>[5-6]</sup>。

针对激光胶接点焊工艺和焊接过程存在的问题,国内外学者开展了大量的研究。任大鑫等<sup>[7]</sup>通过采集分析激光焊接过程的焊接光谱,发现胶层增大了试件对激光的吸收率。Messler等<sup>[8]</sup>分析发现,焊点周围施加压力可减小金属板间胶层受热气化后对熔池的冲击作用。王铭茂等<sup>[9]</sup>研究了不同胶层的气体排开方式,设计了脉冲波形以适应不同粘度的胶层。刘申等<sup>[10]</sup>以钛合金为对象,研究发现胶层分解后产生的残余碳使激光点焊-胶接复合接头出现了碳化钛(TiC),从而增大了接头的显微硬度,但同时削弱了接头的承载能力。对于点焊接头的无损检测,Liu等<sup>[11]</sup>通过分析时域和频域的特征信号,获得了不锈钢点焊接头的超声C扫描图像,并设计了当量计算程序来自动计算焊核直径。Sun等<sup>[12]</sup>将电阻点焊接头的超声C扫描图像划分为不同的区域,可以表征飞溅、焊穿等焊接缺陷。然而,目前通过正交试验来研究不同焊接工艺参数对激光胶焊接头质量的影响规律,以及分析接头超声C扫描图像特征的文献鲜有报道。

本文以焊接功率、离焦量和焊接时间为参数,对DP590双相钢进行了激光胶接点焊的正交试验,借助电液伺服材料试验机对接头进行了拉剪试验,分析了不同工艺参数对接头拉剪性能的影响,并对失效接头进行了断口分析;借助超声波扫描显微镜研究了不同参数下接头的超声C扫描图像的特性和不同区域的超声A扫描信号特征。

## 2 试验方法

### 2.1 材料和试样制备

用于激光胶接点焊连接的母材是规格为110 mm×20 mm×1.5 mm的DP590双相钢钢片,其化学成分如表1所示,力学性能如表2所示。采用单搭方式,搭接方式如图1所示,粘接剂选用高分子结构胶——环氧树脂胶(DP460)。

采用的激光焊接系统为德国IPG公司生产的YLG-6000光纤激光器。胶焊过程的具体步骤为:1)用砂纸对母材表面进行打磨,再用丙酮溶液擦拭去掉表面氧化物;2)对搭接区域定量施胶,并用夹

子将搭接好的试件夹紧,以确保胶层厚度的一致性;3)将粘接后的试件进行激光点焊;4)把试件放入恒温箱24 h,对搭接区的胶层进行固化。焊接过程中采用的保护气体为氩气,吹气方式为侧吹,气流速率为15 L/min。

表1 DP590化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of DP590 (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	P	S
Content	0.15	0.07	1.79	0.22	0.18

表2 DP590的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of DP590

Elastic modulus / GPa	Tensile strength / MPa	Yield strength / MPa	Elongation / %
140	595	355	16

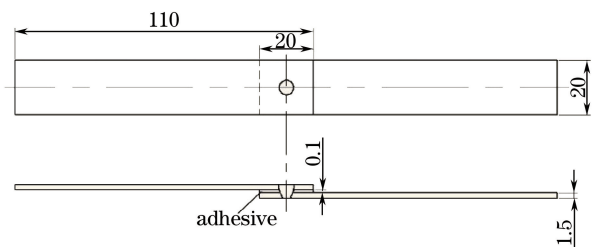


图1 试件搭接示意图

Fig. 1 Sketch map of lap specimen

### 2.2 正交试验设计

选择焊接功率、离焦量和焊接时间为变量进行三因素三水平胶焊正交试验,焊接功率选择1400, 1600, 1800 W,离焦量选择3, 0, -3 mm,焊接时间设定为200, 600, 1000 ms,制定9组试验方案,如表3所示,每组连接4个试件。

表3 正交试验方案

Table 3 Scheme of orthogonal experiment

Group	Power /W	Time /ms	Defocusing /mm
1	1400	200	-3
2	1400	600	0
3	1400	1000	3
4	1600	200	3
5	1600	600	-3
6	1600	1000	0
7	1800	200	0
8	1800	600	3
9	1800	1000	-3

### 2.3 点焊接头质量检测

借助超声波扫描显微镜,采用超声波水浸聚焦入射法得到激光胶接点焊接头的超声A扫描信号和超声C扫描图像。试验所用检测系统的探头频率为15 MHz,分辨率为95 μm,耦合剂为水。

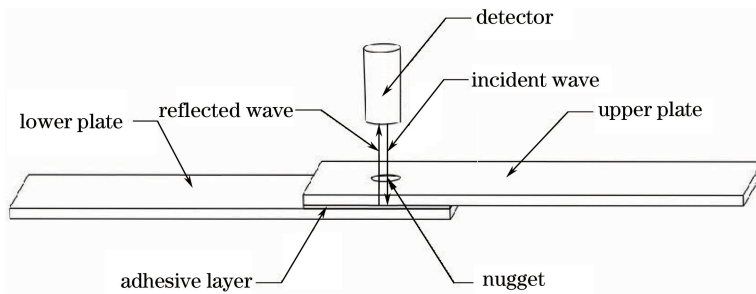


图2 超声C扫描成像检测示意图

Fig. 2 Schematic of ultrasonic C-scan imaging detection

采用 MTS 公司的电液伺服材料试验机对 9 组激光胶接点焊接头进行拉剪试验, 拉伸过程中加载速度设为  $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。为克服试件拉伸过程中产生的弯矩, 在试件夹持部分贴上  $25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$  的垫片。拉剪过程结束后, 采用 SEM 对胶焊接头的断口进行宏观和微观形貌分析。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 胶焊接头的形貌特征

依照表 3 正交试验方案对板材进行激光胶接点焊操作后获得 9 组接头, 激光胶接点焊上表面和下表面的形貌特征如图 3 所示。可以看出, 第 2 组和第 6 组上表面出现下塌现象, 这是因为金属在激光热作用下被迅速加热, 部分金属气化导致熔池中金属损失, 在激光停止加热后, 焊点处金属开始凝固, 液体金属在重力作用下下沉, 最终焊点上表面出现下塌现象。

图 4 所示为第 1, 7, 9 组参数下的胶焊接头超声 C 扫描图像, 根据超声 A 扫描信号的变化特征和超声 C 扫描的图像特征, 可将激光胶接点焊接头划分为焊核区、热影响区、气体排开的空腔区及胶层区。

提取各区域的超声 A 扫描信号, 结果如图 5 所示。焊接完成后焊核区形成了较均匀的组织, 声波在此区域均匀衰减至 0, 如图 5(a) 所示, 但由于晶粒比母材粗大, 焊核区超声波衰减速度大于母材。由于热影响区在焊接时受热不均, 且受到胶层分解所产生的碳元素的影响, 形成的晶粒差异较大, 因此声波在此区域的衰减过程比较复杂, 如图 5(b) 所示。远离焊核区未发生气化的胶层的超声 A 扫描信号如图 5(c) 所示, 由于胶层的存在, 其二次回波幅值未见衰减。而空腔区中的胶层已发生了气化反应, 上板下表面所反射的二次回波出现了明显衰减, 如图 5(d) 所示, 传播介质的不均匀性使超声波在此区域的衰减速度明显大于胶层区。对比三组接头超声 C 扫描图像可以发现, 随着焊接工艺参数的变化, 各个区域的大小也发生变化, 且随着焊接功率的增大, 焊点处热输入增大, 导致胶层气化后气体排开现象明显, 第 7 组和第 9 组试件的空腔区面积大于第 1 组。以热影响区边缘为起点, 取焊核区最长距离作为点焊接头的焊核直径, 则第 1, 7, 9 组的焊核直径分别为 2.27, 2.99, 3.23 mm, 与对应的失效载荷呈正相关。

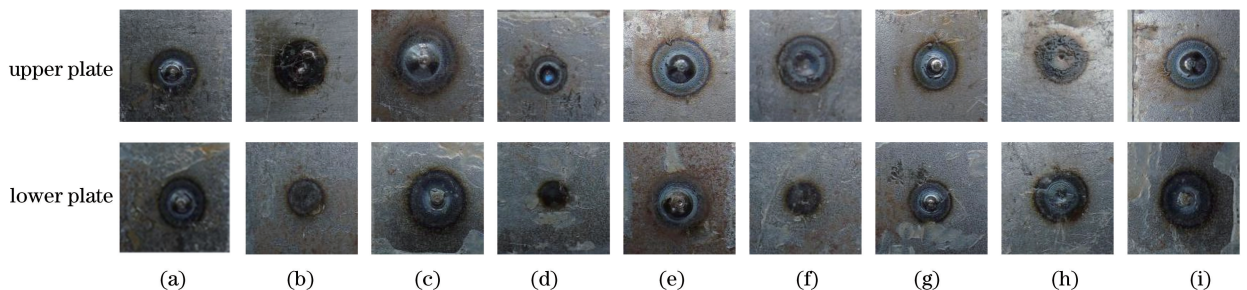


图3 1~9组焊点表面形态。

(a)第1组;(b)第2组;(c)第3组;(d)第4组;(e)第5组;(f)第6组;(g)第7组;(h)第8组;(i)第9组

Fig. 3 Surface morphologies of solder joints in 1-9 groups. (a) Group 1; (b) group 2; (c) group 3;

(d) group 4; (e) group 5; (f) group 6; (g) group 7; (h) group 8; (i) group 9

#### 3.2 工艺参数与拉剪性能

对正交试验后得到的 9 组接头进行重复的拉伸

剪切试验, 获得了接头的平均峰值载荷数据, 如表 4 所示。可以发现, 第 9 组胶接点焊接头的峰值载荷

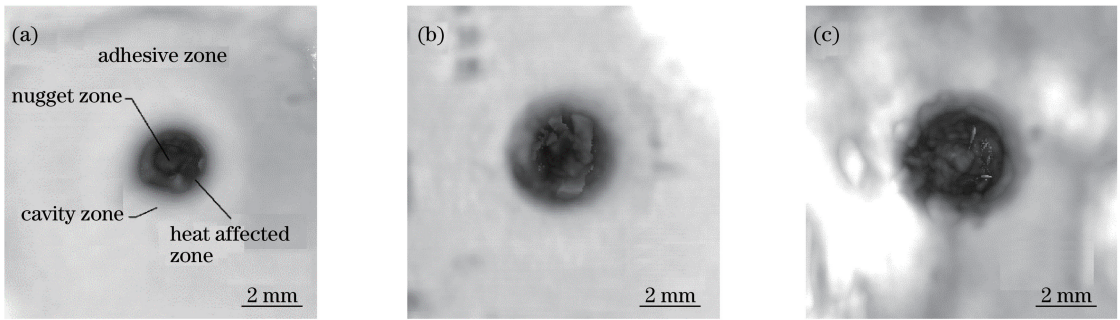


图4 超声C扫描图像。(a)第1组;(b)第7组;(c)第9组

Fig. 4 Ultrasonic C-scanning images. (a) Group 1; (b) group 7; (c) group 9

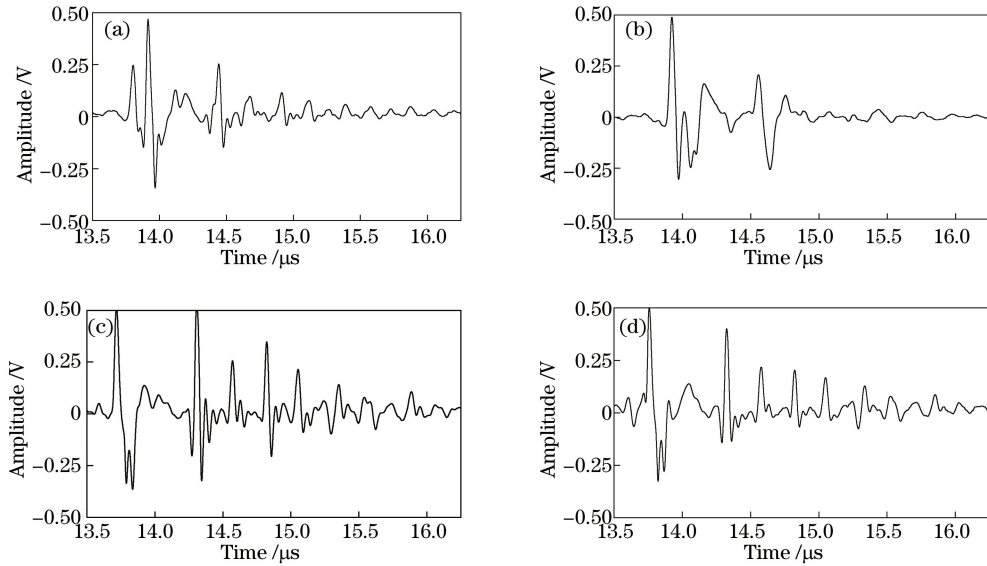


图5 接头不同区域的超声A扫描信号。(a)焊核区;(b)热影响区;(c)胶层区;(d)空腔区

Fig. 5 Ultrasonic A-scan signals of joints in different regions. (a) Nugget zone; (b) heat-affected zone; (c) adhesive zone; (d) cavity zone

最大,为 7529.30 N,对应的焊接功率为 1800 W,焊接时间为 1000 ms,离焦量为  $-3$  mm;第 1 组接头的峰值载荷最小,为 6531.40 N,对应的焊接功率为 1400 W,焊接时间为 200 ms,离焦量为  $-3$  mm。另外,1~8 组胶接点焊接头的静强度均小于粘接接头,这是因为激光的热效应使胶层发生气化,胶层在搭接面的有效连接区域减小,而激光点焊不足以补偿胶层气化引起的强度损失。

表4 接头的峰值载荷

Table 4 Peak load of joints

Group	Peak load /N	Group	Peak load /N
1	6531.40	6	6711.35
2	6543.48	7	6726.92
3	6757.04	8	6887.32
4	6989.79	9	7529.30
5	6697.18	Adhesive-bonded joint	7072.86

对三个工艺参数对应的峰值载荷进行计算后得到极差数据,如表 5 所示,其中  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  分别表示功率、离焦量、时间对应的峰值载荷。可以看出,在离焦量由负变正的过程中,接头的平均峰值载荷先减小后增大,当采用负离焦量时能获得抗拉强度更好的接头。不同焊接功率水平的峰值载荷极差值为 437.21 N,说明焊接功率对接头峰值载荷的影响最大,其次是焊接时间,而离焦量对接头峰值载荷影响最小。焊接功率和时间的交互影响作用如图 6 所示,可以看出,在一定范围内缩短焊接时间和增大焊接功率可以增大接头的静强度。当焊接功率小于 1600 W 时,焊接时间对峰值载荷影响很小,这是因为采用低功率焊接时,胶层排开的范围较小,此时胶层对接头强度的贡献更大。当焊接功率大于 1600 W,焊接时间大于 600 ms 时,随着焊接时间和焊接功率的增大,峰值载荷增大的速率明显加快,虽

然胶层的烧灼和气化同样会削弱连接节点的强度，但在此工艺参数下焊点的形核质量得到了提高。

表 5 三个工艺参数下峰值载荷的极差分析

Table 5 Range analysis for peak loads under three process parameters

Load class	$L_1$	$L_2$	$L_3$
Level 1	6610.64	6919.29	6749.37
Level 2	6799.44	6660.58	6709.32
Level 3	7047.85	6878.05	6999.23
Range	437.21	258.70	289.90

N

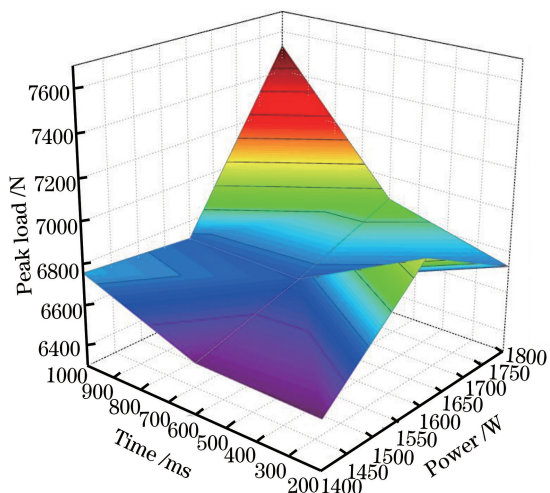


图 6 焊接时间和焊接功率对峰值载荷的交互作用

Fig. 6 Interactive effect of laser power and welding time with peak loads

### 3.3 拉剪断口分析

选取正交试验中峰值载荷高、中、低三个水平的

点焊接头，利用 SEM 观察其拉剪断口宏观形貌和不同位置的微观断口形貌。第 1,7,9 组的拉剪断口宏观形貌如图 7 所示，可以看出，三组宏观断口可分为三个区域，即胶层断裂区、胶层气化后气体排开的空腔区和激光焊点断裂区。第 9 组的激光焊点断裂区的面积大于第 1 组和第 7 组，说明焊点的大小与接头抗拉强度呈正相关。三组接头在拉伸过程中均是胶层先发生混合失效，然后是激光焊点发生界面断裂失效。

激光胶接点焊接头焊点断裂区不同位置的拉剪微观断口如图 8 所示。对第 1 组焊点断裂区不同位置进行扫描后发现，整个断口均为拉长韧窝形貌，该接头受到拉剪力后，焊点界面处发生了韧性断裂。第 7 组接头的抗拉强度水平在正交试验中为中等，该组接头微观断口在焊点不同位置表现出不同特征，B 点的断口出现高密度的撕裂棱和解理小面，符合准解理断口特征，C 点处断口形貌为剪切断裂的拉长韧窝，在拉长韧窝中，还存在小的卵形韧窝，这是因为焊核中有第二相粒子。由此可推断出，此接头在胶层失效后，焊点边缘首先发生准解理特征的脆性断裂，随后裂纹在焊点内扩展，最后焊点中心发生韧性断裂。这是因为胶层分解产生的碳元素增加了焊点的硬脆性，使焊点发生了这种过渡断裂形式。第 9 组接头为正交试验中抗拉强度最大的接头，其断口形貌为拉长韧窝，焊点界面处发生了韧性断裂。

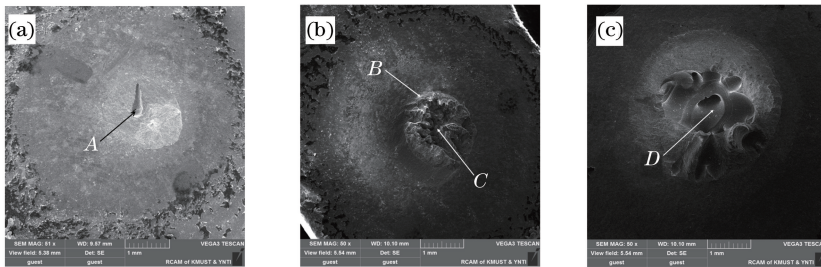


图 7 断口的宏观形貌。(a)第 1 组;(b)第 7 组;(c)第 9 组

Fig. 7 Macro-morphologies of fatigue fractures. (a) Group 1; (b) group 7; (c) group 9

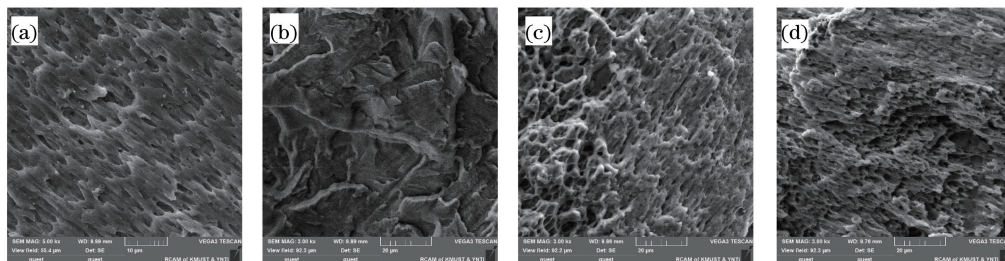


图 8 断口的微观形貌。(a) A 点;(b) B 点;(c) C 点;(d) D 点

Fig. 8 Micro-morphologies of fatigue fractures. (a) Point A; (b) point B; (c) point C; (d) point D

## 4 结 论

以焊接功率、离焦量和焊接时间为参数,对 DP590 双相钢钢板进行了激光胶接点焊的正交试验,得到如下结论。

1) 当焊接功率为 1800 W、焊接时间为 1000 ms、离焦量为 -3 mm 时,激光胶接点焊接头的平均峰值载荷最大,为 7529.30 N。通过极差分析可知,焊接功率对接头的静强度影响最大,焊接时间次之,离焦量的影响最小。

2) 结合超声 A 扫描信号,可将激光胶接点焊接头超声 C 扫描图像分为焊核区、热影响区、空腔区及胶层区,且能有效测量激光焊点的直径,高、中、低失效载荷下接头对应的焊核直径分别为 2.27, 2.99, 3.23 mm,胶焊接头抗拉强度与激光焊点直径呈正相关。

3) 平均峰值载荷分别为高、中、低的三组接头在拉剪过程中的失效过程均为胶层先断裂,随后激光焊点界面处发生断裂失效,在激光焊点断裂区的断口处观察到剪切力作用下形成的拉长韧窝。

## 参 考 文 献

- [1] Fan Z J, Gui L J, Su R Y. Research and development of automotive lightweight technology[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5(1): 1-16.  
范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(1): 1-16.
- [2] Zhou D W, Li N N, Xu S H, *et al.* Analysis of the adhesive layer of laser weld bonding joints in dual phase steel/aluminum alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 14: 25-30.  
周恺武, 李苏宁, 徐少华, 等. 双相钢/铝合金激光胶接焊胶层作用分析[J]. 机械工程学报, 2016, 14: 25-30.
- [3] Dong D Y, Wang G J, Ma M, *et al.* Study on microstructure and properties of laser welding dual phase steel joints for an auto-body [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9): 0903002.  
董丹阳, 王观军, 马敏, 等. 车用双相钢激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0903002.
- [4] Costa H R M, Reis J M L, Souza J P B, *et al.* Experimental investigation of the mechanical behaviour of spot welding-adhesives joints [J]. Composite Structures, 2015, 133: 847-852.

- [5] Ma Y N, Tao W, Chen Y B. Laser spot welding of LF6 aluminum with double laser beams[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 707-711.  
马轶男, 陶汪, 陈彦宾. LF6 铝合金双光束激光点焊工艺研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 707-711.
- [6] Lü T, Lei Z L, Chen Y B, *et al.* Influence of different shapes on the mechanical properties of laser spot weld of TC4 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12): 1203002.  
吕涛, 雷正龙, 陈彦宾, 等. 焊点形状对 TC4 钛合金激光点焊力学性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203002.
- [7] Ren D X, Liu L M. Analysis of the adhesive layer of laser weld bonding joints in magnesium alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 266-270.  
任大鑫, 刘黎明. 镁合金激光胶接焊胶层作用分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 266-270.
- [8] Messler R W, Bohnenstiehl S, Levene J, *et al.* A pressure assisted approach for laser beam weld bonding Al alloy structure for automobiles [J]. Assembly Automation, 2004, 24(4): 370-378.
- [9] Wang M M, Tao W, Ma Y N. Research on laser spot weld-bonding process characteristics [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(7): 101-104.  
王铭茂, 陶汪, 马轶男, 等. 激光胶接复合点焊工艺特性[J]. 焊接学报, 2012, 33(7): 101-104.
- [10] Liu S, Ma Y N, Tao W, *et al.* Study on microstructure and properties of titanium spot weld-bonded joint [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(12): 1203004.  
刘申, 马轶男, 陶汪, 等. 钛合金激光点焊胶接复合接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1203004.
- [11] Liu J, Xu G C, Xu D S, *et al.* Ultrasonic C-scan detection for stainless steel spot welding based on wavelet package analysis [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science, 2014, 30(3): 580-585.
- [12] Sun X Y, Zeng K, He X C, *et al.* Ultrasonic C-scan imaging and analysis of the mechanical properties of resistance spot-welded joints of stainless steel [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2017, 32(3): 242-254.