

焊点排布方式对激光点焊-胶接复合接头断裂过程的影响

马铁男¹ 陶汪^{1,2*} 陈彦宾¹ 王铭茂¹

(¹ 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)
(² 哈尔滨工业大学国防科技热加工重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 以 J-11 为填充胶粘剂, 采用 CO₂ 脉冲激光对低碳钢 Q195 进行了激光点焊-胶接复合连接试验。对不同焊点排布情况下复合接头的断裂过程进行了研究。结果表明, 当只有 1 个焊点时, 复合接头在拉剪载荷作用下, 复合接头两端的胶接部分首先开裂, 焊点部分最后断裂; 当焊点排布方向与受力方向一致时, 复合接头内焊点外侧的胶层首先开裂, 然后是焊点之间的胶层发生断裂, 最后是焊点部分开裂; 当焊点排布方向与受力方向垂直时, 复合接头内的胶接部分先开裂, 焊点部分随后断裂。另外, 采用有限元方法对不同焊点排布方式的复合接头受一定拉剪力时, 接头内的应力分布情况进行分析, 解释焊点排布方式带来的影响, 分析结果与试验结果相吻合。

关键词 激光技术; 激光点焊-胶接复合; 焊点排布; 断裂过程; 有限元模拟; 应力分布

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1003002

Influence of Spot Arrangements on Laser Spot Weld Bonded Joint Fracture Process

Ma Yanan¹ Tao Wang^{1,2} Chen Yanbin¹ Wang Mingmao¹

¹ State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

² National Key Laboratory of Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The CO₂ pulse laser is used in laser spot weld bonding test using Q195 mild steel and adhesive J-11. The fracture process of laser spot weld bonded (LWSB) joints with different spot arrangements is studied. The results show that the adhesive bonded area in LWSB joint firstly fractures, and then the spot fractures, when there is only one spot in LWSB joint. When the spot arrangement in LWSB joint is parallel to the load direction, the fracture sequence is the adhesive bonded area outside of the spot, and the adhesive bonded area inside of the spot. When the spot arrangement in LWSB joint is vertical to the load direction, the adhesive bonded area of the LWSB first fractures, then the adhesive bonded area and the spot fracture together. Besides, the finite element modeling is used to analyze the influence of spot arrangement in LWSB joint on stress distribution under some tensile-shear condition. The calculated results are in good agreement with the experimental results.

Key words laser technique; laser spot weld bonding; spot arrangement; fracture process; finite element modeling; stress distribution

OCIS codes 140.3390; 140.3470; 160.3900

1 引言

自上世纪 60 年代电阻点焊-胶接复合技术应用于 AN-24 飞机上以来^[1], 已广泛地应用于航空航天、

汽车制造等领域^[2-5]。其复合接头兼具点焊接头重量轻、可靠性好、静强度高和胶接接头疲劳密封性好等优点, 又同时克服了单一连接方式的不足^[6]。对于

收稿日期: 2013-03-25; **收到修改稿日期**: 2013-05-14

作者简介: 马铁男(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事激光点焊-胶接复合方面的研究。E-mail: tigerman7@163.com

导师简介: 陈彦宾(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工基础及应用等方面的研究。

E-mail: chenyb@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: taowang81@sina.com

电阻点焊-胶接复合接头的力学性能研究,受到了国内外学者的广泛关注。但是大部分是关于单焊点条件下电阻点焊-胶接复合接头的力学行为的研究,而对于多焊点情况下的力学行为的研究则少有系统性成果发表。常宝华等^[7]利用有限元模型对多焊点结构中焊点间距对结构力学行为的影响进行了研究。赵波等^[8]以单焊点胶焊接头解析模型为基础,建立多焊点情况下胶焊单搭拉剪接头的应力解析模型。

自第一台红宝石激光器诞生起,激光焊接技术因其自身良好的工艺性,得到了焊接工作者极大的重视^[9-11],目前已经广泛的应用于生产生活中。2004年,美国爱迪生焊接研究所(EWI)提出了激光点焊-胶接复合连接技术,并将其成功地应用于美国国家航空航天局(NASA)的小飞机运输系统(SATS)项目中^[12]。但通过美国学者 Messler 等^[13]的研究可以发现,激光点焊-胶接复合连接工艺中,胶层气化后对熔池会产生严重的冲击作用,影响激光点焊的稳定性。通过前期研究发现^[5],采用特殊的脉冲激光,可以使胶层预先气化,并且胶层气体通过金属板间的胶层排出,以达到弱化胶层气体对于熔池的冲击作用。但是该方法会使焊点周围的胶层在胶层气体作用下向周围流动,可能会对焊点周围

胶层的胶接面积产生影响。特别是在多焊点情况下,焊点之间的胶层在多次的胶层气体推动下,残留的胶层是否还能够形成可靠的胶接部位,目前未有研究。

本文主要是在以往研究的基础上,进一步研究在多焊点情况下,焊点的排布方式对激光点焊-胶接复合接头在承受拉剪载荷断裂过程的影响。另外,通过有限元模拟的方法,对不同焊点排布方式的复合接头在受拉剪载荷时的应力分布情况进行分析,研究不同的焊点排布方式对应力分布的影响。

2 实验材料及方法

实验中采用的金属母材为 Q195 低碳钢,具有良好的焊接性,其化学成分如表 1 所示。在本文中,主要对 3 种焊点排布方式的断裂过程进行对比,分别为单焊点(A 型),与受力方向平行的双焊点(B 型)以及与受力方向垂直的双焊点(C 型),具体的焊点排布方式及接头形式如图 1 所示。并且对试件进行拉剪力学性能测试。拉剪力学性能测试采用设备为 INSTRON MODEL 5569 电子万能试验机,拉剪测试加载速度为 3 mm/min。

表 1 Q195 低碳钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Q195 mild steel (mass fraction, %)

Element	C	Mn	Si	S	P
Content	0.06~0.12	0.25~0.50	0.30	0.050	0.045

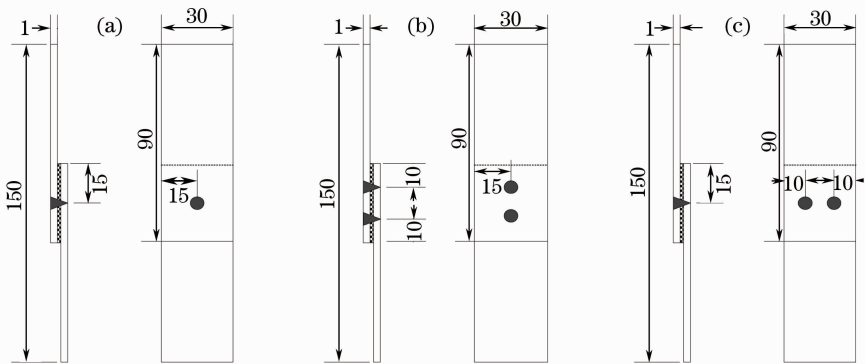


图 1 激光点焊-胶接复合接头拉剪试样尺寸(单位:毫米)。(a) A 型;(b) B 型;(c) C 型

Fig. 1 Geometries of LSWB tensile shear test specimen joints (unit: mm). (a) A type; (b) B type; (c) C type

胶粘剂采用由黑龙江省科学院石油化学研究院提供的 J-11,该胶粘剂属于双组分环氧树脂,常温状

态下为液态,室温下混合后放置 48 h 即可固化,其主要特性如表 2 所示。

表 2 J-11 的主要特性

Table 1 Main characteristics of J-11

Adhesive	Type	Curing method	Curing time /h	Shear strength /MPa	Tensile strength /MPa
J-11	two component epoxy	room temperature curing	48	28.5	49.2

试验中采用的激光器是德国 ROFIN-SINAR 公司生产的射频激励扩散冷却式 CO₂ 激光器,最大功率为 3 kW, 聚焦焦距为 190 mm, 焦斑直径为

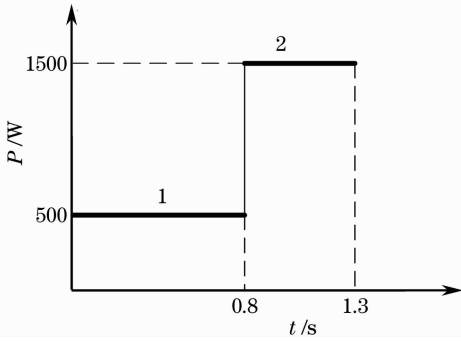


图 2 脉冲激光波形

Fig. 2 Pulse waveform of pulsed laser

0.2 mm。采用激光器自带的控制系统对输出激光束进行调整,形成所需的脉冲波形,具体输出的激光脉冲波形如图 2 所示。其中,第一段脉冲的功率 P 为 500 W,脉冲宽度 t 为 0.8 s,其目的是以金属板间的胶层进行预气化,因此称其为预气化脉冲。而第二段脉冲的功率 P 为 1500 W,脉冲宽度 t 为 0.5 s,该段脉冲的目的是形成焊点,因此称其为点焊脉冲。

具体的激光点焊-胶接复合连接工艺的原理如图 3 所示,当预气化脉冲作用到金属上板时,金属上板保持未熔透熔状态,通过热传导使金属板间的胶层气化,使胶层气体只能通过金属板间的胶层排出,避免胶层气体对熔池的冲击;而点焊脉冲开始工作时,激光作用的金属板间区域胶层气体的压力已经不足以对焊接熔池产生冲击,此时较大功率的点焊接使金属上下板连接到一起,形成焊点。

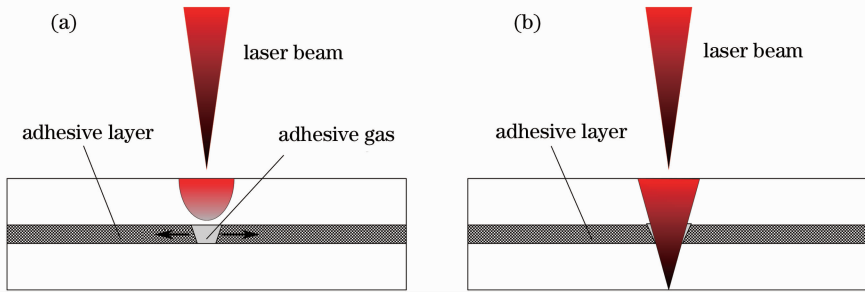


图 3 激光点焊-胶接复合过程示意图。(a) 预气化脉冲; (b) 点焊脉冲

Fig. 3 Schematic diagram of LSWB process. (a) First period of pulsed laser; (b) second period of pulsed laser

3 复合接头有限元模型

在本文中,主要采用内聚力界面单元来模拟复合接头内胶接接头部分的界面层的力学性能。针对图 1 中所示的不同焊点排列方式的激光点焊-胶接复合接头,采用 ABAQUS 有限元软件建立有限元模型。图 4 给出了 A 型焊点排列的试件有限元模

型。金属上、下板采用 C3D8R 单元,胶层采用 COH3D8 单元。模型的一端固定约束端面的自由度,同时在模型的另外一端施加载荷。分析中对复合接头的试件进行适当的简化,认为结构连接完好,

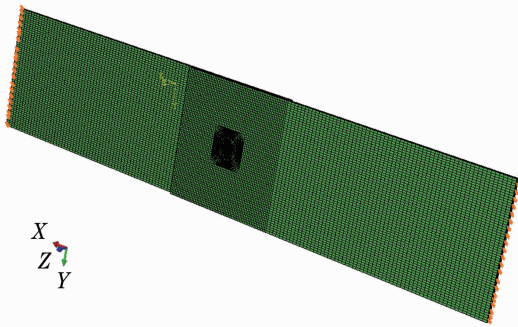


图 4 A 型焊点排列的复合接头有限元模型

Fig. 4 Finite element model of laser spot weld bonding specimen with type A arrangement

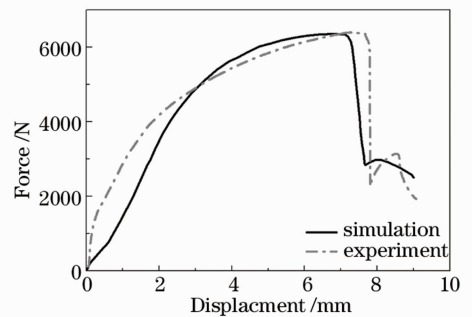


图 5 A 型焊点排布的复合接头的试验与模拟拉剪曲线对比

Fig. 5 Comparison of tensile shear curve between experimental results and numerical predictions for the laser spot weld bonding specimen with type A arrangement

胶层与母材之间结合的界面不存在任何的缺陷。利用模型对 B 型和 C 型焊点的复合接头拉剪断裂过程进行分析。图 5 所示为 A 型焊点排布的复合接头试验与模拟的拉剪曲线,由图中可以看出模拟获得的拉剪曲线与试验所得拉剪曲线吻合较好。

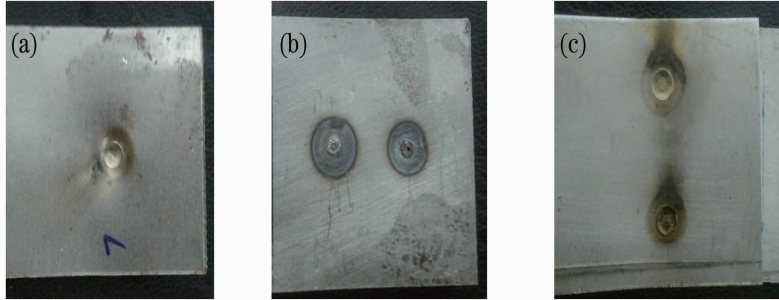


图 6 不同焊点排布接头宏观形貌。(a) A 型接头; (b) B 型接头; (c) C 型接头

Fig. 6 Macroscopic views of joints with different types of spots arrangement.

(a) Type A joint; (b) type B joint; (c) type C joint

图 7(a)所示为焊点排列方式为 A 型时点焊-胶接复合接头与激光点焊和胶接接头的拉剪曲线,图 7(b)则表示的是接头断裂过程的示意图。从曲线中,可以明显确认激光点焊-胶接复合接头在拉剪实验中其断裂强度以及变形能力都要优于单独的激光点焊和胶接接头。并且复合接头的拉剪曲线存在 2 个峰值,当复合接头处于第一个峰值时,复合接头内部焊点周围的胶接区域发生断裂[图 7(b)中 I 区],此时复合接头内的焊点开始单独受力[图 8(a)所示]。而当复合接头处于第二个峰值时,复合接头内

4 试验结果及讨论

4.1 不同焊点排布方式复合接头的拉剪试验研究

图 6 所示为不同焊点排布的激光点焊-胶接复合接头断裂后的宏观形貌图片。

的焊点也发生断裂[图 7(b)中 II 区]。由此,焊点排布为 A 型的激光点焊-胶接复合接头的拉剪断裂过程可以理解为首先在外部加载的拉剪载荷作用下,复合接头内的点焊接头部分和胶接接头部分共同承受载荷并且整体接头发生变形偏转,当外加拉剪载荷达到一定值时,处于复合接头外围的胶接接头部分首先发生断裂,此时加载在胶接接头部分的载荷消失,只有点焊接头处于承载状态,随后点焊接头独自承载直至断裂。

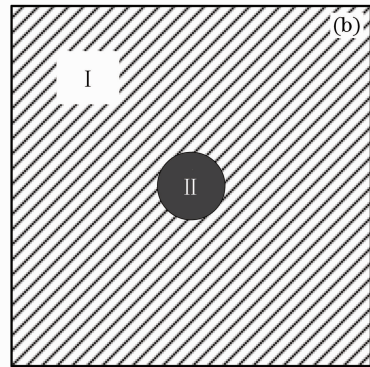
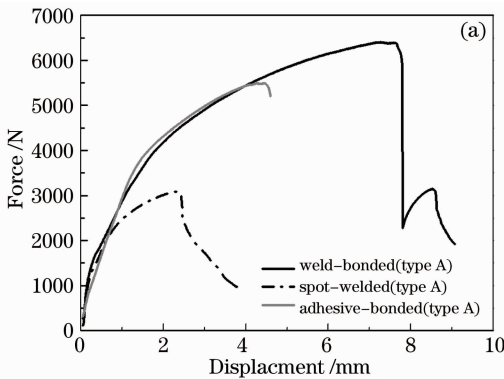


图 7 A 型焊点排布接头拉剪过程。(a) 接头拉剪曲线; (b) 断裂过程示意图

Fig. 7 Tensile-shear process of joints with type A spots arrangement. (a) Curves of tensile-shear testing for joints; (b) schematic diagram of fracture process

图 9(a)所示为焊点排列方式为 B 型时点焊-胶接复合接头与激光点焊和胶接接头的拉剪曲线。激光点焊-胶接复合接头的断裂曲线呈现出与激光点焊接头和胶接接头完全不同的形貌。激光点焊接头虽然在平行于受力方向上有 2 个焊点,但是其拉剪曲线只出现 1 个峰值,即这 2 个焊点在拉剪过程中

几乎同时发生断裂,并未有明显的顺序断裂迹象。相反,在激光点焊-胶接复合接头的拉剪曲线中出现了 3 个峰值,也就是说拉剪过程中出现了明显的顺序断裂迹象。当复合接头所受的外加拉剪载荷达到第一个峰值时,双焊点外侧的胶层发生开裂[图 9(b)中 I 区],此时双焊点内侧的胶层区域并未发生

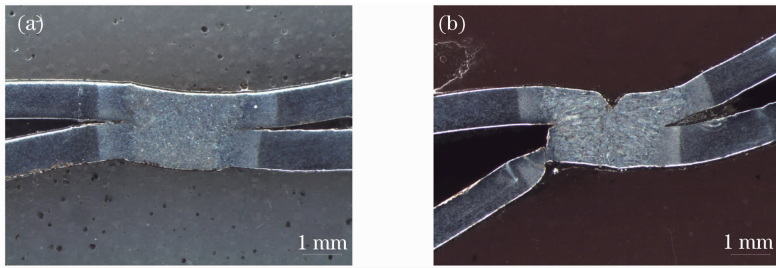


图 8 A 型焊点排布接头拉剪过程接头宏观形貌。(a) 胶层断裂后；(b) 焊点断裂后

Fig. 8 Macroscopic views of joints with type A spots arrangement during tensile-test process.

(a) Joints after adhesive-bonded broken; (b) joints after webled-joint fracture

断裂现象[图 10(a)];随后在继续加载的过程中,很快外加载荷达到第二个峰值,此时双焊点之间的胶层发生开裂[图 9(b)中 II 区],但是焊点仍然保持承载状态[图10(b)];而当复合接头受的外加拉剪载

荷达到第三个峰值时,复合接头的双焊点同时发生断裂[图 9(b)中 III 区]。由此可知,当采用 B 型焊点排列方式时,焊点能够起到一定的阻碍裂纹在复合接头内扩展的作用。

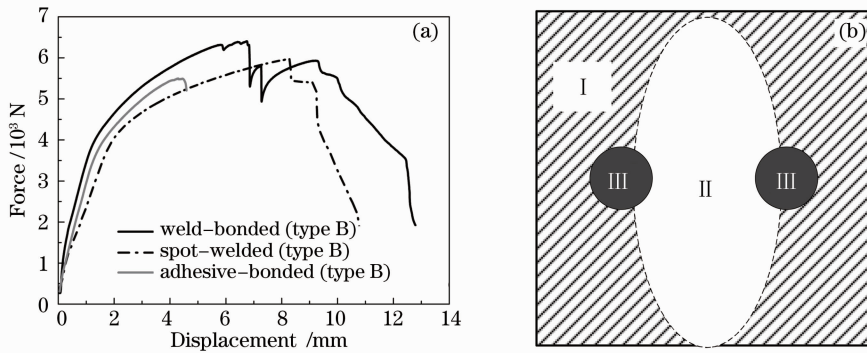


图 9 B 型焊点排布接头拉剪过程。(a) 接头拉剪曲线；(b) 断裂过程示意图

Fig. 9 Tensile-shear process of joints with type B spots arrangement. (a) Curves in tensile-shear testing for joints; (b) schematic diagram of fracture process

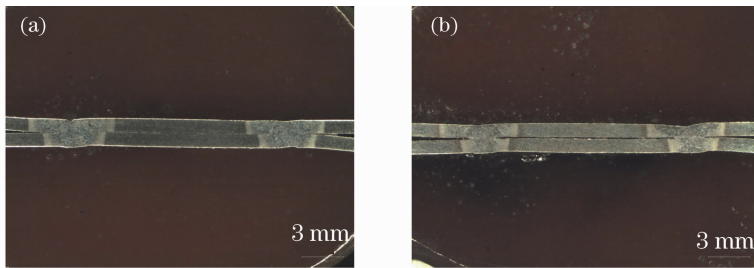


图 10 A 型焊点排布接头拉剪过程。(a) 接头拉剪曲线；(b) 断裂过程示意图

Fig. 10 Tensile-shear process of joints with type A spots arrangement. (a) Curves in tensile-shear testing for joints; (b) schematic diagram of fracture process

图 11(a)所示为焊点排布方式为 C 型的 3 种不同连接方式接头的拉剪曲线。从图中,可以很清晰地看出 3 种接头的拉剪曲线与 A 型焊点排列时的接头拉剪曲线很类似,其中 C 型焊点排列激光点焊接头的拉剪曲线相比于 A 型焊点排列的激光点焊接头而言,仅仅是拉剪强度有一定程度的提高,但是曲线的形貌和断裂韧性都没有明显区别。而 C 型

焊点排列的激光点焊-胶接复合接头拉剪曲线与 A 型焊点排列的复合接头相比,两者都存在 2 个峰值,第一个峰值对应的是复合接头内所有胶层的开裂[图 11(b)中 I 区],第二个峰值对应的是双焊点的开裂[图 11(b)中 II 区]。另外,与 A 型焊点排列的复合接头相比,C 型焊点排列方式的复合接头断裂韧性有一定量的提高。

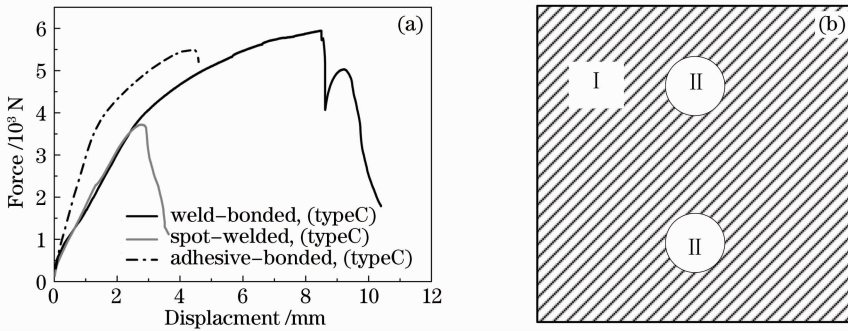


图 11 C 型焊点排布接头拉剪过程。(a) 接头拉剪曲线；(b) 断裂过程示意图

Fig. 11 Tensile-shear process of joints with the type C spots arrangement. (a) Curves in tensile-shear testing for joints; (b) schematic diagram of fracture process

从表 3 中的数据可以清楚地发现,不同焊点排布方式复合接头的拉剪性能存在着一定的差别。A 型与 B 型焊点排布方式的复合接头最大承载力较大,而 B 型与 C 型焊点排布方式最终失效时的位移最大。并且,从 B 型焊点排布的复合接头拉剪曲线可以很清晰地看到,焊点之间的胶层仍然起到了一定的连接作用。

表 3 激光点焊-胶接复合接头拉剪性能数据

Table 3 Tensile-shear test performance data of laser spot weld-bonded joints

Arrangement type	Maximum load /N	Maximum distance /mm
A	6396	9.05
B	6403.5	12.79
C	5946	10.40

4.2 拉剪过程模拟

图 12~14 为 A 型、B 型和 C 型复合接头在外载荷为 3000 N 时的金属上板与胶层接触一侧的应力分布情况,其中 σ_x 表示在 x 方向,即受力方向的应力, σ_z 表示金属板面方向的应力。从这些图中可以很明显地发现,应力大多集中于焊点周围和胶接头端部。但同时,不同焊点排布方式的接头在焊点之间区域的应力分布上也出现了明显的不同,当焊点排布方式为 C 型时,在焊点之间的区域的应力明显低于周围区域。但是在 B 型焊点排布时,结果则出现相反的结果。这主要是由于当复合接头受力时,复合接头内焊点的周围会产生一定的应力集中现象,并且位于受力方向上的两端会产生应力集中区域,而垂直于受力方向上的焊点两端会产生应力弱化区域,如图 12 所示。因此当焊点沿受力方向排布时(B 型),应力在焊点之间的区域发生叠加效应,使得该区域应力高于周围区域;而当焊点分步方向垂直于受力方向时(C 型),在焊点之间会在叠加的效应下产生一个应力明显弱化的区域。

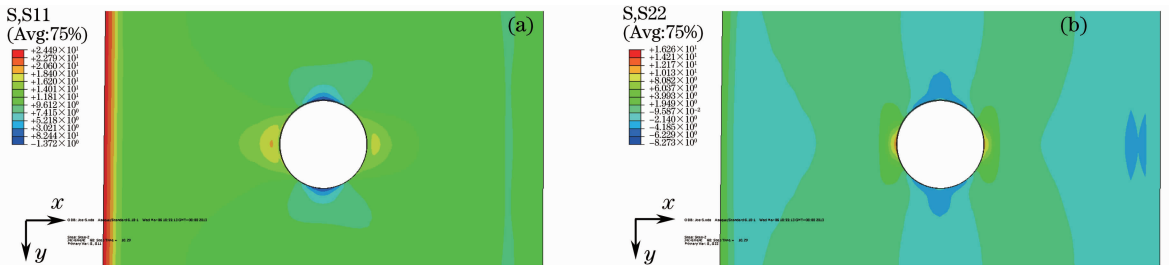


图 12 A 型焊点排布应力分布图。(a) σ_x 应力分布；(b) σ_z 应力分布

Fig. 12 Stress distribution of the joint with type A spots arrangement. (a) Normal stress σ_x distribution; (b) normal stress σ_z distribution

图 15 中所表示的是当复合接头发生第一次断裂时(即拉剪曲线第一个峰值处),B 型和 C 型接头的胶层的开裂情况。SDEG 是一种界面层失效参数,其主要作用为监控界面层的断裂形为。当其值为 1 时表示该处模型已经发生断裂。由图 15 可知,

在复合接头发生第一次断裂时,B 型焊点排布的复合接头中胶层都发生开裂,而 C 型焊点排布的复合接头中胶层完全开裂。这一现象与试验所获得的拉剪曲线以及相应的过程分析相符。

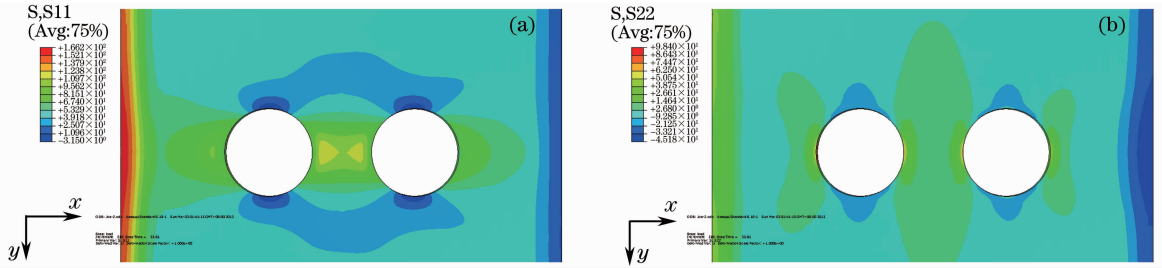


图 13 B型焊点排布应力分布图。(a) σ_x 应力分布；(b) σ_z 应力分布

Fig. 13 Stress distribution of the joint with type B spots arrangement. (a) Normal stress σ_x distribution; (b) normal stress σ_z distribution

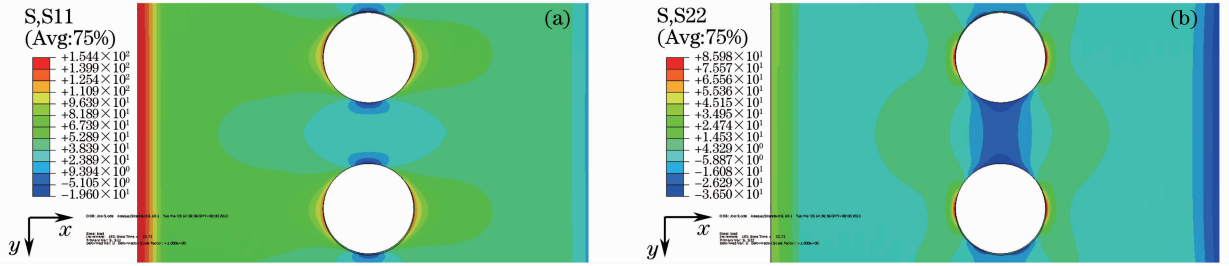


图 14 C型焊点排布应力分布图。(a) σ_x 应力分布；(b) σ_z 应力分布

Fig. 14 Stress distribution of the joint with type C spots arrangement. (a) Normal stress σ_x distribution; (b) normal stress σ_z distribution

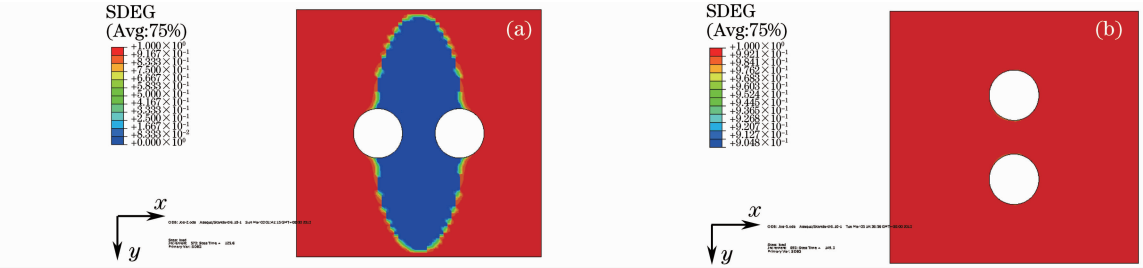


图 15 接头第一次断裂时的 SDEG 分布。(a) B型焊点排布；(b) C型焊点排布

Fig. 15 SDEG distributions of joints with different types of spots arrangement at the first fracture. (a) Type B spots arrangement; (b) type C spots arrangement

5 结 论

1) 激光点焊-胶接复合接头的拉剪力学性能在不同的焊点排布情况下, 获得的最大拉剪力和最终失效位移不同。其中焊点排布与受力方向一致时所得拉剪力以及最终失效位移最大, 分别为 6403.5 N 和 12.79 mm。

2) 焊点的存在起到了阻碍裂纹在复合接头胶层内部扩展的作用, 不同排布方式会影响裂纹在激光点焊-胶接复合接头内胶层部分的扩展路径。当焊点的排布方向与受力方向一致时, 焊点的存在会使胶层的开裂过程分为两部分: 首先是复合接头的外部胶层会在拉剪力的作用下开裂, 然后是焊点之间的胶层发生开裂。但当焊点与受力方向垂直布置时, 则无此现象。

3) 焊点排布方向与受力方向一致时, 会在焊点之间的区域产生较大的应力集中现象; 而当焊点的排布方向与受力方向垂直时, 焊点之间的区域则出现明显的应力弱化现象。

参 考 文 献

- 1 M M Schwartz. Metals Joining Manual Book[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979. 1-32.
- 2 S M Darwish. Analysis of weld-bonded dissimilar materials[J]. International J Adhesion & Adhesives, 2004, 24(4): 347-354.
- 3 I O Santos, W Zhang, V M Gonçalves. Weld bonding of stainless steel[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(14): 1431-1439.
- 4 V M Gonçalves, Paulo A F Martins. Joining stainless steel parts by means of weld bonding[J]. Int J of Mech Mater Des, 2006, 3(1): 91-101.
- 5 Yinan Ma, Wang Tao, Liqun Li, et al.. Laser spot weld bonding of mild steel[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives,

- 2012, 34: 1-5.
- 6 Zhao Bo, Yue Peng. Stress and stiffness analysis for weld-bonding single-lap joints [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(1): 24-32.
赵波, 岳鹏. 单搭接剪胶焊接头的应力和刚度分析[J]. 应用力学学报, 2008, 25(1): 24-32.
- 7 Chang Baohua, Shi Yaowu, Lu Liangqing. Effect of spot pitch on stress and strain distribution and strength of weld-bonded joints [J]. Journal of Materials Engineering, 2000, 1: 33-37.
常宝华, 史耀武, 卢良清. 焊点间距对胶焊接头应力应变分布和强度的影响[J]. 材料工程, 2000, 1: 33-37.
- 8 Zhao Bo, Lü Zhenhua. Static analysis for weld-bonded single-lap shear joint with multiple weldspots [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009, 26(2): 239-242.
赵波, 吕振华. 多焊点情况下胶焊单搭接接头的静力分析[J]. 应用力学学报, 2009, 26(2): 239-242.
- 9 Li Liqun, Tao Wang, Zhu Xianliang. Wire filling laser multilayer welding of high strength steel thick plate [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1251-1255.
李俐群, 陶汪, 朱先亮. 厚板高强度钢激光填丝多层焊工艺[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1251-1255.
- 10 Qin Hao, Lei Zhenglong, Chen Yanbin, *et al.*. Mechanical properties of laser-MAG hybrid welding on low alloy high strength steel [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1003005.
秦浩, 雷正龙, 陈彦宾, 等. 低合金高强度钢激光-MAG 复合多层焊接头力学性能 [J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1003005.
- 11 Mei Lifang, Chen Genyu, Jin Xiangzhong, *et al.*. Study on fiber laser overlap-welding of automobile aluminum alloy [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2091-2097.
梅丽芳, 陈根余, 金湘中, 等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2091-2097.
- 12 Wang Mingmao. Research on the Characteristic of Mild Steel Laser Spot Weldbonding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. 7.
王铭茂. 激光-胶接复合点焊特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. 7.
- 13 R W Messler, Scot Bohnenstiehl, John Levene, *et al.*. A pressure assisted approach for laser beam weld bonding Al alloy structure for automobiles [J]. Assembly Automation, 2004, 24(4): 370-378.

栏目编辑: 宋梅梅