

激光点焊接头力学性能与失效数值模拟研究

郑帮智^{1,2}, 田晓琳^{1,2}, 王泽龙^{1,2}, 冯兆龙^{1,2}

(1. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300)

摘要: 测试了三种形状的激光焊点在拉伸、剪切、剥离工况下的静态和动态力学性能, 分析了点焊焊缝的显微组织特性和硬度分布情况。结果表明, 焊点形状与焊点力学性能密切相关, C型焊点整体性能更优; 焊点强度随加载速率的增加而发生塑性强化, 加载速率越大, 塑性强化越明显; 焊缝整体分布均匀, 过度平滑, 融合区和热影响区硬度高。基于LS-DYNA焊核合力失效准则, 研究了激光点焊接头失效数值仿真方法, 明确了等效焊核直径用于模拟激光点焊失效方法的有效性。

关键词: 汽车板; 激光点焊; 力学性能; 焊点失效; 数值仿真

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)01-0165-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.01.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Numerical simulation study on the mechanical properties and failure of laser spot welding joint

Zheng Bangzhi^{1,2}, Tian Xiaolin^{1,2}, Wang Zelong^{1,2}, Feng Zhaolong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China;
2. Chengdu Advanced Metal Materials Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China)

Abstract: The static and dynamic mechanical properties of three kinds of laser welded joints under tensile, shearing and peeling conditions were tested, and the microstructure characteristics and hardness distribution of the spot welded joints were analyzed. The results show that the shape of solder joints is closely related to their mechanical properties, and the overall properties of C-type solder joints are better. The strength of solder joints is plastically strengthened by the increase in loading rate, and the greater the loading rate, the more obvious the plastic strengthening is. The overall distribution of welding seam is uniform and excessively smooth, while the hardness of fusion zone and heat affected zone is high. Based on the LS-DYNA failure criterion, the numerical simulation method of laser spot welding joint failure is studied, and the effectiveness of equivalent core diameter used to simulate laser spot welding failure is clarified.

Key words: steel sheet for automobile, laser spot welding, mechanical properties, solder joint failure, numerical simulation

0 引言

激光点焊技术作为汽车车身连接的关键前沿技

术, 由于其具有高效灵活以及轻量化等突出特点, 已逐渐在各大汽车主机厂推广应用。激光点焊又称远程激光焊, 是采用激光作为热源, 利用高速扫描振镜

收稿日期: 2022-09-19

作者简介: 郑帮智, 1988年出生, 男, 四川宜宾人, 工程硕士, 工程师, 主要研究方向: 材料动态性能测试与仿真, E-mail: zbz315@126.com。

进行长工作距离加工的一种激光焊接方法。相比传统电阻点焊,激光点焊具有热影响区小、工件变形小、定位精度高、焊接速度快、焊接效率高等特点^[1]。

目前,国内外对激光点焊的研究主要集中在焊接工艺、组织性能以及质量控制等方面,对焊接接头的力学性能研究还相对较少,特别是对于焊接接头的失效分析还未见相关报道。马铁男等^[2-4]研究了铝合金、高强钢等材料的激光点焊过程,提出了双光束点焊以及激光胶接点焊工艺;J LONG等^[5]对铝合金激光点焊工艺进行了研究,明确了铝合金在高压环境下的熔池动态行为;M Alizadeh Sh等^[6-7]研究了304L不锈钢、异材钢和铝之间的激光点焊工艺,确定相关点焊工艺参数;李萌等^[8-9]利用KSII试验方法及LS-DYNA对电阻点焊失效数值

仿真方法进行了研究,确定了所述电阻点焊失效参数和失效模型的正确性。

笔者通过研究激光点焊接头的力学性能,并结合数值仿真与试验验证对某典型汽车板激光点焊接头的失效行为进行对比分析,明确了激光点焊接头的力学特征以及失效模拟方法。

1 材料及方法

试验材料为DC04深冲用冷轧汽车钢板,厚度为0.7 mm,屈服强度为130 MPa,抗拉强度为280 MPa。由于激光点焊的灵活性,试验设计了3种焊点形状,分别为C型、II型和O型,如图1所示。每种形状的焊点其焊缝长度取一致,均为20.5 mm。

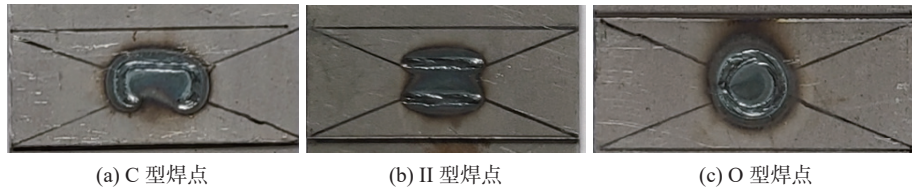


图1 不同形状的激光焊点
Fig. 1 Three kinds of different shapes of laser welding spots

试验焊接设备包括激光系统和作动装置,激光系统包括IPG YLS-6000-S4T光纤激光器、激光-电弧复合焊接头以及2D振镜,作动装置由ABB六轴机器人和两轴联动工作台组成。激光器最大输出功率6 kW,波长1.06 μm,焦距250 mm,最小光斑直径0.6 mm。试验前用丙酮将试样表面进行脱脂处理,并置于烘干箱烘干待用。正面采用氩气保护,氩气

流速25 L/min,激光功率2.3 kW,焊接速度30 mm/s,离焦量0 mm。

考虑焊点部件在使用过程中的实际工况,将焊点受力形式分成三种:剪切型、拉伸型、剥离型,如图2所示。综合三种工况下焊接接头的变形特点,可为后续激光点焊接头的力学性能和失效模拟研究提供保障。

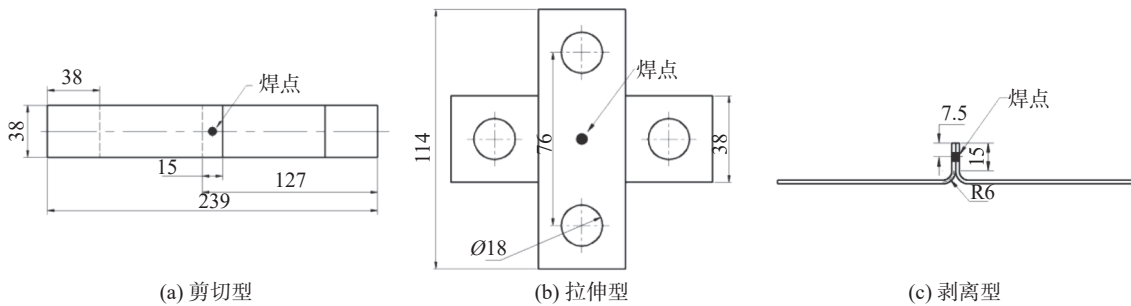


图2 焊点不同受力工况下的搭接样式(单位:mm)
Fig. 2 Overlapping patterns of solder joints under different loading conditions

2 力学性能

力学性能分析主要用于评估激光点焊接头质量,包括静态拉伸、显微硬度、金相组织等静态性能以

及高速拉伸动态性能。

2.1 拉伸性能

静态拉伸试验采用INSTRON 100kN材料万能试验机,高速拉伸采用Zwick HTM5020型试验机

进行试验。试验包括剪切、拉伸、剥离三种形式的高、低速率拉伸试验, 同时每种拉伸形式对应 C 型、

II 型和 O 型三种焊点形状。静态拉伸试验如图 3 所示。

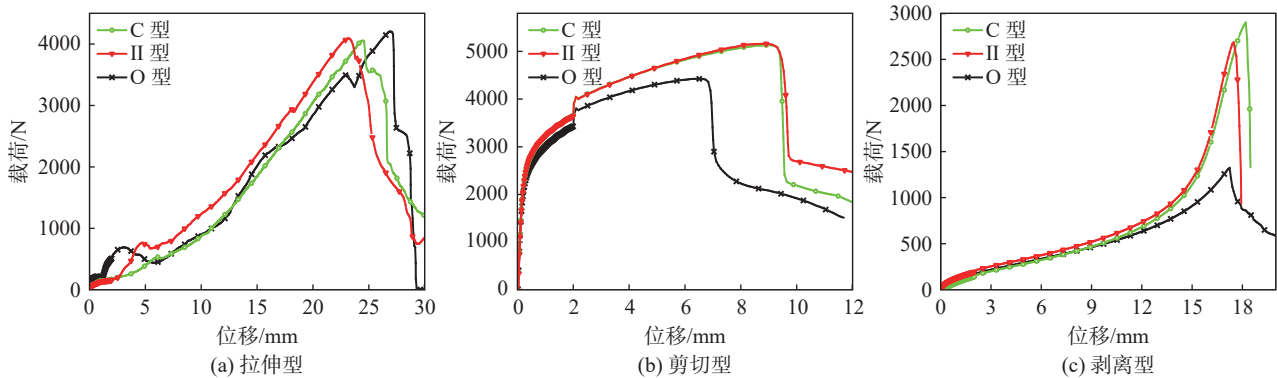


图 3 静态拉伸位移载荷曲线
Fig. 3 The displacement loading curves of static tension tests

对比图 3(a)、(b)可知,C 型和 II 型焊点在拉伸和剪切工况下所能承受的最大载荷比较接近, 约分别为 4 000 N 和 5 000 N。在图 3(c)中,O 型焊点所能承受的剥离载荷较小, 相比较 C 型和 II 型焊点, 下降了 50%。综合对比三种工况下焊接接头的静态力学性能可知,C 型焊点接头的静态力学性能表现更优。

点接头试样, 拉伸速率分别为 0.1、1、5 m/s。

高速拉伸试验主要用于测试点焊接头在动态高应变率下的变形行为。高速拉伸试验选用 C 型焊

图 4 中, 三种工况下焊点所承受的载荷都随加载速率的增大而增大。在图 4(a)中, 低速率 0.1 m/s 时的拉伸位移滞后较多, 因为低加载速率下母材先于焊点发生较大塑性变形, 母材贡献了较多位移量。在图 4(b)中, 焊点接头的抗剪载荷塑性强化明显, 速率由低到高, 抗剪极限载荷跨度为 6 000 ~ 8 000 N。图 4(c)中, 高速率 5 m/s 时的剥离载荷响应较快, 表现为超前位移下发生焊点塑性强化。

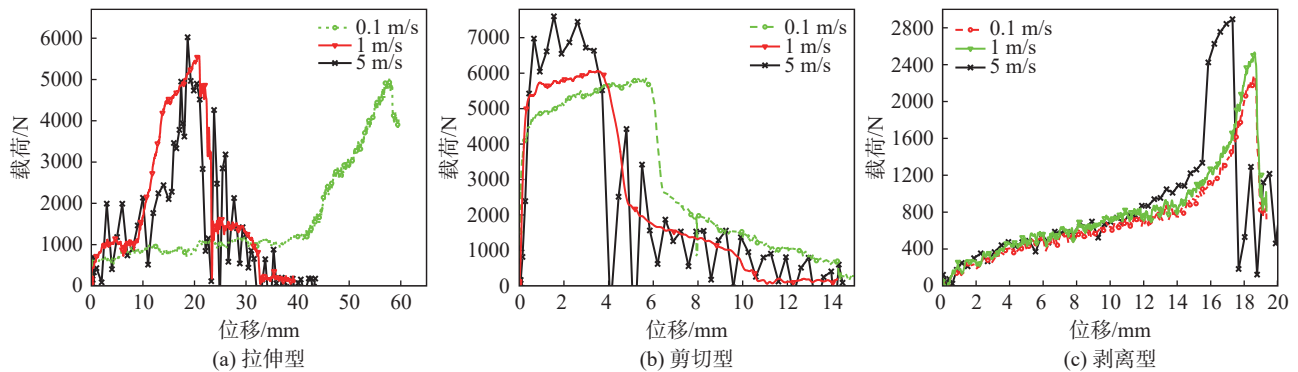


图 4 高速拉伸位移载荷曲线
Fig. 4 The displacement loading curves of high-speed tensile tests

2.2 金相组织

由于 C 型、II 型和 O 型三种激光点焊试验所用材料均为 DC04, 且板厚、焊接工艺参数均相同, 因此在金相分析和显微硬度分析时, 只需选择一种焊点形状试样进行分析即可, 文中以 C 型焊点为例, 如图 5 所示。由图 5(a)可知, 激光点焊接头表面无明显飞溅, 焊缝宽度整体均匀, 与母材之间过渡平滑, 无咬边等焊接缺陷。焊缝区呈“直条形”, 正面熔宽

与背面熔宽基本一致。图 5(b)所示的焊缝融合区微观组织主要由不均匀的多边形铁素体晶粒和少量颗粒状贝氏体组成。由于激光点焊具有热输入集中、冷却速度快、液态金属过冷度高等特点, 因此焊缝中心的晶粒长大时温度梯度各向异性并不明显, 最终在焊缝中心区形成了多边形铁素体晶粒; 同时, 熔化的金属液晶胞以母材为基底进行非均匀形核, 晶粒沿着温度梯度最大的方向长大。在图 5(c)中, 焊

点热影响区组织中没有形成具有明显特征的区域性组织,主要为相对粗大的铁素体柱状晶组织,且生长

方向垂直于熔合线。

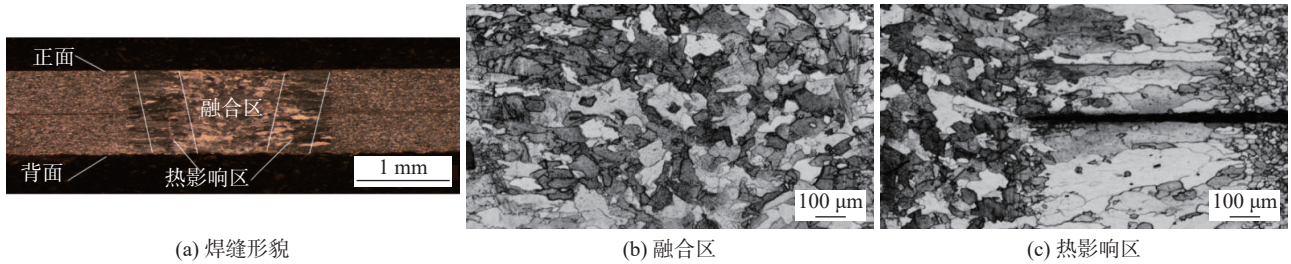


图5 激光点焊焊缝组织
Fig. 5 The morphology and microstructures of the laser spot welding seam

2.3 显微硬度

硬度作为反应材料弹性和塑性的重要指标,在焊缝的研究中起着重要作用。由于激光点焊的热输入能源较集中,焊缝区域较小,因此采用显微硬度表征激光点焊的焊缝性能是必要的。C型焊点的焊缝硬度分布如图6所示。

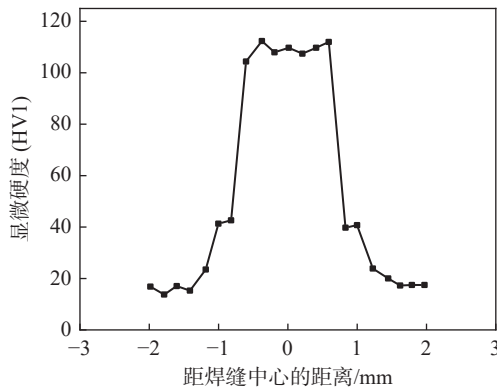


图6 C型焊点焊缝的显微硬度

Fig. 6 The micro-hardness distribution of the laser spot welding seam

由图6可知,母材平均显微硬度(HV1)值约为85,从母材到焊缝中心,显微硬度逐渐增大,到焊缝中心区域附近硬度(HV1)值最高约为126,热影响区的平均硬度(HV1)值约为95。母材中含有微量的Mn、Ti等合金元素在高温下溶解,随后在快速凝固的焊缝融合区和热影响区中起到了固溶强化的作用,致使融合区和热影响区的硬度值高于母材。另外,焊缝中形成了少量的贝氏体,从而导致焊接接头的焊缝中心融合区硬度最高。

3 失效模拟

3.1 失效理论

由于激光点焊结构形式复杂,数值仿真中难以

用应力应变模型进行描述。现有文献中通常采用力学模型进行点焊失效特性描述,即由试验中的载荷-位移关系得到焊点的极限强度,然后通过力学分析和试验结果拟合得到经验力学模型。焊点在实际承载过程中主要受到沿焊点接触面的剪切力 N_{rs} 和 N_{rt} 、垂直于接触面的正拉力 N_{rr} 、平行接触面的弯矩 M_{rt} 和 M_{ss} ,以及垂直于接触面的扭矩 M_{rr} ,通常沿接触面的剪切力和垂直接触面的正拉力是导致焊点失效的主要载荷形式。焊核受力情况如图7所示。

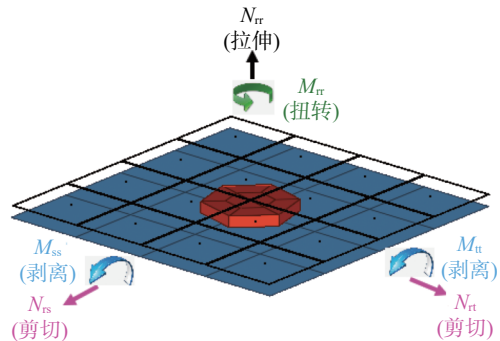


图7 仿真模型中焊核的受力情况

Fig. 7 The forces and moments of weld nugget in the simulation model

激光点焊部件及产品在冲击、碰撞等外载作用下,焊点会受到如图7所示的各种形式的力和力矩的作用,焊点的失效就是由这些力和力矩综合作用的结果。笔者基于显式动力学软件LS-DYNA中的MAT100焊点模型研究激光点焊接头失效模拟方法,以焊核合力失效模式为准则如式(1)所示。

$$\left(\frac{\text{Max}(N_{rr},0)}{N_{rrF}}\right)^2 + \left(\frac{N_{rs}}{N_{rsF}}\right)^2 + \left(\frac{N_{rt}}{N_{rtF}}\right)^2 + \left(\frac{M_{rr}}{M_{rrF}}\right)^2 + \left(\frac{M_{ss}}{M_{ssF}}\right)^2 + \left(\frac{M_{tt}}{M_{ttF}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

式中的参数对应图7所示, N_{rr} 为轴向拉力; N_{rs} ,

N_{rt} 为径向剪切力; M_{ss} , M_{tt} 为径向弯矩; M_{rt} 为轴向转矩(由于其数值较小,为简化计算, M_{rt} 通常取值为0); N_{rtF} 为失效轴向力; N_{rsF} , N_{rtF} 为失效径向剪切力; M_{rtF} 为失效轴向转矩; M_{ssF} , M_{ttF} 为失效径向弯矩。

在式(1)中的分母是焊点失效模拟中的关键参数,需要结合试验数据和数值模拟计算得到;式(1)中的分子为焊点在外载作用下实际所承受的各种力和力矩,其数值根据文中所述剪切、拉伸、剥离三种拉伸工况得到。当焊点实际所受的力和力矩满足式(1)时,则判定焊点失效。

3.2 模拟与验证

根据图 2 所示的焊接示意,分别建立剪切、拉伸、剥离三种搭接形式的有限元模型。模型搭建采用 HyperMesh 软件,求解及后处理采用 LS-DYNA 软件。焊点失效模拟基于焊核合力失效准则,在 HyperMesh 中建立焊点模型时,需要将激光点焊焊缝横截面等效为圆形横截面以模拟 MAT100 模型中的焊核。已知焊缝长度为 20.5 mm,测得焊缝宽度为 1.23 mm,等效后的焊核直径约为 $\varnothing 5.6$ mm。模型中,母材采用壳单元,焊点采用 8 节点实体单元。DC04 母材材料参数如表 1 所示,材料的应力应变曲线和硬化曲线如图 8 所示。

剪切、拉伸、剥离三种有限元模型的边界约束条件相同,即一端刚性完全约束,另一端按既定速率加载。激光点焊接头失效参数拟合步骤:①计算同一加载速率下的剪切、拉伸、剥离三种有限元模型,此时三种模型的材料参数中无失效参数;②在三种有限元模型中分别提取各自的截面力(时间-载荷曲

线)和试验峰值力(时间-载荷曲线),确定各模型截面力和试验峰值力相等的时刻;③在 LS-DYNA 中输出三个模型,此时焊核的参数为 N_{rt} 、 N_{rs} 或 N_{rt} 、 M_{ss} 或 M_{tt} ;④将三个模型输出的焊核参数分别带入式(1),得到一个方程组,求解方程组得到激光点焊接头焊核失效参数 N_{rtF} 、 N_{rsF} 或 N_{rtF} 、 M_{ssF} 或 M_{ttF} 。

焊点失效参数需要根据既定加载速率的有限元模型和试验进行计算得到,不同加载速率下计算得到的点焊接头焊核失效参数不同。以 1 mm/min 的加载速率进行仿真和试验对比验证,结果如图 9、10 所示。

表 1 DC04 材料参数
Table 1 Material parameters of DC04

密度/(t·mm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	硬化指数
7.8×10 ⁻⁹	210 000	0.3	130	228.09

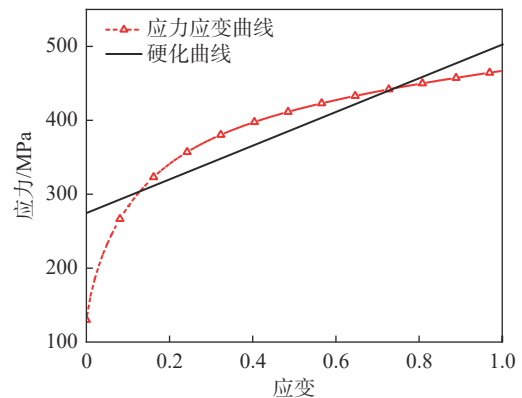


图 8 DC04 材料曲线
Fig. 8 The material curves of DC04

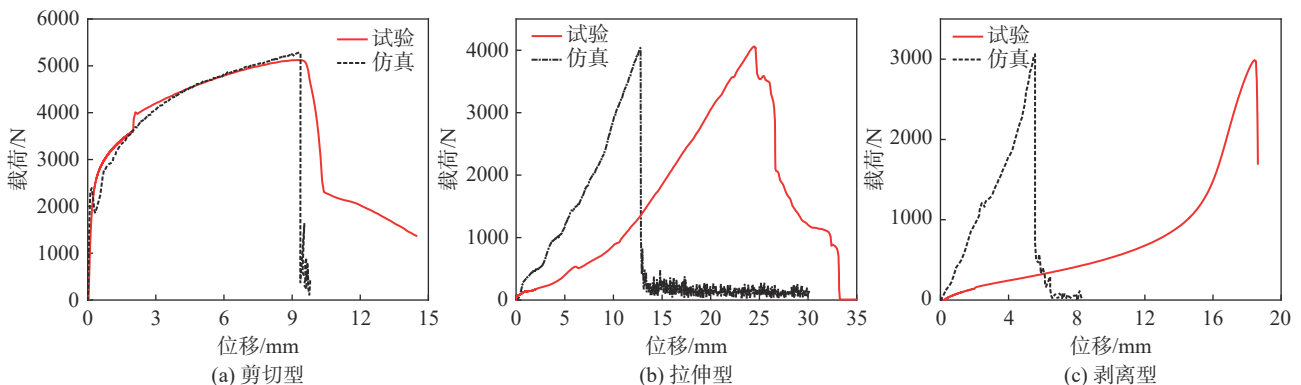


图 9 仿真与试验的失效位移载荷曲线对比
Fig. 9 Comparison of the failure displacement loading curves between simulation and the tests

如图 9、10 所示,对比激光点焊接头在剪切、拉伸、剥离三种失效模式下的仿真和试验验证结果可以看出,不管是失效载荷分布还是形貌特点,仿真与

试验结果一致性较好。如图 10(a)所示,由于激光点焊接头剪切型试验与常规拉伸试验相似,不需要额外夹具夹持试样,因此,如图 9(a)所示,试验位移

损失较少,曲线中仿真和试验的失效位移相近;而对于需要专用夹具的拉伸和剥离型试验,夹具中存在的细微装配间隙都会造成试验位移滞后,因此在

图9(b)和图9(c)中试验所得的失效位移相比仿真滞后较多。

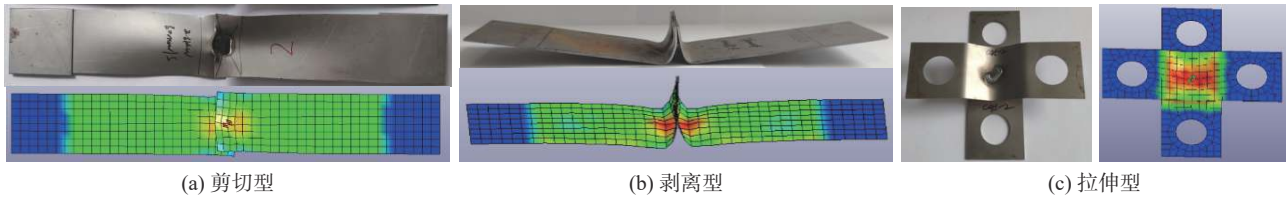


图10 仿真与试验的效果对比
Fig. 10 Compared with the failure results of simulation and test

4 结论

1)通过对比三种激光焊点形状静态加载的拉伸、剪切、剥离工况下的力学性能,发现II型和C型焊点整体性能更佳,O型焊点抗剥离载荷相对较弱,相较于II型和C型焊点下降超50%。

2)在动态加载时,三种工况下的焊点强度都随

加载速率的增加而发生塑性强化。

3)DC04激光点焊焊缝显微组织以不规则多边形铁素体和少量贝氏体为主,焊缝融合区和热影响区的硬度明显高于母材。

4)采用焊核等效直径方法,可将LS-DYNA中焊核合力失效准则应用于激光点焊接头失效模拟,经仿真与试验对比验证,效果良好。

参考文献

- [1] Huang Donglin, Yang Yongqiang. An experimental study on spot shape based on galvanometer scanning laser spot welding[J]. Applied Laser, 2009, 29(3): 199-228.
(黄冬林, 杨永强. 基于振镜扫描的激光点焊焊点形状分析[J]. 应用激光, 2009, 29(3): 199-228.)
- [2] Sun Xinyu. Analysis on laser spot weld bonding process and joint strength of steel DP590[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
(孙鑫宇. DP590钢板激光胶接点焊工艺及接头强度分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.)
- [3] Wang Luting, Huang Yongde, Chen Yuhua. Microlaser spot welding technology and joint performance[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(5): 22-26.
(汪芦婷, 黄永德, 陈玉华. GH4145激光点焊工艺及接头性能研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 22-26.)
- [4] Ma Yinan, Tao Wang, Chen Yanbin. 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.)
- [5] Long Jian, Zhang Linjie, Zhang Liangliang, et al. Fiber laser spot welding of molybdenum alloy in a hyperbaric environment[J]. Optics Express, 2020, 28(6): 7843-7857.
- [6] Alizadeh Sh M, Falsafi F, Masoumiet M, et al. Laser spot welding of AISI 304L: metallurgical and mechanical properties[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2014, 41(3): 161-165.
- [7] Goncalo Pardal, Sonia Meco, Andrew Dunn, et al. Laser spot welding of laser textured steel to aluminium[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 241: 24-35.
- [8] Shi Yuliang, Zhu Ping, Shen Libing, et al. Finite element modeling of spot welds based on vehicle impact[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7): 226-230.
(施欲亮, 朱平, 沈利冰, 等. 基于汽车碰撞仿真的点焊连接关系有限元模拟方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 226-230.)
- [9] Li Meng. The research of spot weld failure simulation and layout based on front rail crushing simulation[D]. Shanghai: Shanghai University, 2014.
(李萌. 基于前纵梁压溃仿真的焊点失效模拟及布置研究[D]. 上海: 上海大学, 2014.)