

文章编号 1004-924X(2015)增-0297-08

## 激光高速冲击点焊的工艺实验

张洪峰,王 霄\*,钱 清,李建文,刘会霞  
(江苏大学 机械工程学院,江苏 镇江 212013)

**摘要:**将激光诱导冲击波作为一种驱动加载方式运用于高速冲击点焊,以研究厚度小于 100  $\mu\text{m}$  的异种金属箔板组合的固态点焊连接。设计并搭建了激光高速冲击点焊实验平台,实验中选择 30  $\mu\text{m}$  的钛箔和 T2 紫铜为复板,100  $\mu\text{m}$  厚的铝箔为基板,对影响激光高速冲击点焊连接质量的主要工艺参数,包括碰撞角度、复板的飞行距离和冲击速度进行理论和实验研究。利用显式有限元软件 AUTODYN 中的光滑粒子流体动力学(SPH)法数值模拟了激光高速冲击点焊的焊接过程,结果显示随着飞行距离和冲击速度增大,焊接界面的形貌逐渐由平直状过渡到微波状,以至变成漩涡状,最后成功复制出了中心未连接区域和环状焊接区域。此外,通过观测非连接区域和焊接区域的剪切应力和有效塑性变形,发现当复板和基板碰撞界面处的剪切应力方向相反,且有效塑性变形大于 0.4 时,才能实现有效的固态冶金结合。

**关键词:**激光冲击点焊;激光诱导冲击波;碰撞角度;飞行距离;冲击速度;焊接界面

**中图分类号:**TG485 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0297

## Technological experiments of laser high-speed impact spot welding

ZHANG Hong-feng, WANG Xiao\*, QIAN Qing, LI Jian-wen, LIU Hui-xia

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 202013, China)

\* Corresponding author, E-mail: wx@ujs.edu.cn

**Abstract:** A solid state spot welding technique based on the laser induced shock waves was proposed to achieve the solid-state spot welding between dissimilar metal combinations with the thickness less than 100  $\mu\text{m}$ . An experimental platform of laser impact spot welding was designed and built. In welding, 30  $\mu\text{m}$  Ti and T2 pure copper were chosen as the flyer plates, and 100  $\mu\text{m}$  Al as the base plate. Parameters including collide angle, impact velocity and the standoff distance, which mainly affect the welding quality, were investigated theoretically and experimentally. The Smooth Particle Hydrodynamic (SPH) method in AUTODYN was applied to simulation of laser impact spot welding process. It is shown that with the increases of impact velocity and standoff distance, the interface morphology turns from straight to small wavy and finally to vortex wavy. Finally, a central un-bonded region and a circular bonded region are duplicated. Moreover, it is shown that when the shear stress direction is opposite and the effective plastic strain is above 0.4 at the interfaces the successful bond can be achieved.

**Key words:** laser impact spot welding; laser induced shock wave; collision angel; standoff distance; impact velocity; weld interface

收稿日期:2015-03-15;修订日期:2015-05-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175235);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2012712)

## 1 引言

高速冲击点焊技术近年来发展迅速,随着研究的深入和应用范围的扩大,国内外学者逐渐对这一领域展开研究。根据驱动加载方式的不同,传统的高速冲击点焊技术主要有水射流冲击点焊<sup>[1]</sup>和弹丸冲击点焊<sup>[2]</sup>,它们分别采用高速水射流和子弹冲击复板使其发生局部塑性变形并与基材高速碰撞实现点焊连接。Salem<sup>[3]</sup>在研究流体和固态高速碰撞性质时,首次提出了应用高速水射流冲击薄板实现不同材料间的点焊连接。Turgutlu 和 Akyurt<sup>[4]</sup>以多种材料组合进行实验,系统研究了水射流冲击焊接的相关工艺参数,包括复板飞行距离、复板厚度和水射流速度。Turgutlu<sup>[5]</sup>等人研究了不同形状子弹冲击点焊过程中的变形特征以及对焊接界面形貌的影响。这两种高速冲击点焊技术使用接触式加载方式,很难保证焊点的表面质量,当复板厚度很薄(小于 100  $\mu\text{m}$ )时,很容易直接穿透复板,无法实现焊接连接。因此,不适合制备一些微型机械装置。

激光诱导冲击波具有超高速、超高压和超高原应变率的特点<sup>[6-8]</sup>,近年来,激光诱导冲击波驱动飞片作为一种新型加载方式被广泛应用于微弯曲<sup>[9]</sup>,微冲裁<sup>[10]</sup>和微压印<sup>[11]</sup>过程,并出现了以激光能量作为驱动方式的高速冲击焊接方法。Barrads<sup>[12]</sup>等人提出了一种基于水作约束层的激光驱动飞片焊接方法。Daehn 和 Lippold<sup>[13]</sup>借鉴爆炸焊接工艺的特点提出了一种低温条件下非接触式点状冲击焊接的方法,张园等人<sup>[14]</sup>研究了厚度为 50  $\mu\text{m}$  的铝和低碳钢的激光焊接工艺。顾宇轩等人<sup>[15]</sup>对 Ti/Al 激光高速冲击点焊进行了研究,发现沿焊点直径方向振幅和周期变化的波形界面和平直型界面。为揭示焊接结合机理和获得最佳焊接结合参数,研究人员在数值模拟方面进行了探讨。Wang 等人<sup>[16-17]</sup>通过数值模拟方法对激光高速冲击焊接过程进行了研究,模拟结果显示相反的剪切应力和有效塑性变形超过一个阈值是形成有效焊接的条件。但是目前研究人员还未涉及具体工艺参数的研究,如复板飞行距离、复板冲击速度等,这些工艺参数与焊接结果密切相关,

会直接影响试样的连接质量和可靠性,甚至关系到焊接成功与否。

本文采用激光高速冲击点焊工艺,旨在研究复板的厚度尺度小于 100  $\mu\text{m}$  的异种金属箔板之间的固态点焊连接。实验研究了厚度为 30  $\mu\text{m}$  的钛箔,30  $\mu\text{m}$  的铜箔和 100  $\mu\text{m}$  的铝板在 0.3、0.6、0.9 mm 三种复板飞行距离和 4、4.5、5J 三种激光脉冲能量条件下的冲击点焊工艺,并对焊点形貌,焊接面积等进行了分析。采用显式有限元软件 AUTODYN 中的 SPH 方法对激光高速冲击点焊的过程的主要工艺参数,包括复板的飞行距离和冲击速度进行了数值模拟,最后研究了影响结合界面波形形状的因素。

## 2 实验原理与装置

### 2.1 实验原理

图 1 所示为激光高速冲击点焊原理图。其焊接原理为:高能短脉冲激光束功率密度( $\text{W}/\text{cm}^2$ 量级;激光脉宽为 ns 量级)经透镜聚焦形成一定大小的光斑透过约束层辐照在吸收层上表面,吸收层被瞬时加热产生局部升温、熔融、气化和喷溅等,产生等离子体并向四周扩散。等离子体扩散的过程中由于受到约束层作用会产生反弹,并在几百纳秒内产生向复板传播的冲击波。当冲击波的峰值压力超过复板材料的 Hugoniot 弹性极限时,复板冲击区域的表面和材料内部会产生局部塑性变形,并驱动复板高速撞击基板。由于光斑中心的能量密度较大,冲击区域中心复板的塑性变形程度更大,复板会发生近似蘑菇状塑性变形。当复板和基板的碰撞角度和冲击速度超过临界值时,在碰撞界面的强塑性剪切变形和高温高压作用下使结合面发生固态冶金结合。在冲击过程中产生的射流现象引起金属结合面的自清理作用使金属很好的结合<sup>[16-17]</sup>。由于激光参数可控,通过改变脉冲激光的能量、光斑直径等参数,可以控制焊点的尺寸,从而实现不同厚度和不同种类基板和复板材料的固态点焊连接。

### 2.2 实验装置

实验采用法国公司生产的 ND:YAG-GAIA R 型超能短脉冲激光器,其主要参数为激光波长

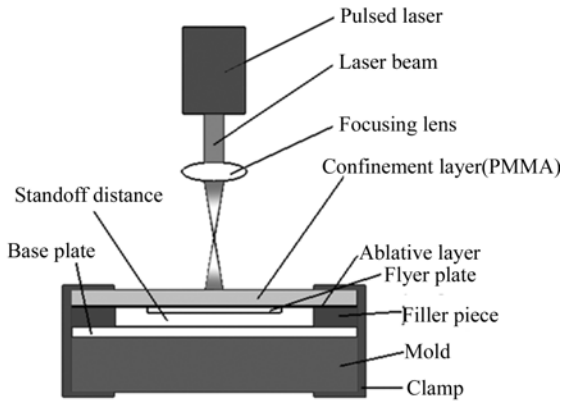


图 1 激光冲击点焊原理图

Fig. 1 Schematic diagram for laser impact spot welding

1 064 nm,脉宽宽度 10 ns,重复频率 1 Hz,单脉冲能量 3~8 J,输出能量可控,光斑大小可调,激光束为准高斯分布。实验装置如图 1 所示,实验系统中主要包含约束层、烧蚀层、复板、基板、垫片和安装夹紧装置。实验中选择密度低且塑性好的工业纯铝作基板,选择 T2 紫铜和工业纯钛作复板,有机玻璃(PMMA)因其优良的透光性、冲击韧性而作为约束层,吸收层材料为黑漆,均匀地涂在厚度为 3.6 mm 的有机玻璃上。用氰基丙烯酸盐黏合剂(乐泰 380)将飞片粘在约束层表面。基板通过黑色绝缘胶带固定在保持架上。通过调节垫片的厚度来控制飞行腔距离。最后,用 2 个燕尾夹将整个装置夹紧。通过调整工作台和聚焦透镜之间的距离控制光斑直径为 3 mm,具体实验参数如表 1 所示。实验开始前,选择粒度为 # 2500 的砂纸轻轻打磨复板和基板的待焊接表面去除氧化层,并用酒精清洗晾干。

表 1 详细的实验条件和样本参数

Tab. 1 Detailed experimental conditions and specimen parameters

Parameters	Values
Material combinations	Ti/Al, Cu/Al
Base plate size/mm	20 × 20 × 0.1
Flyer plate size/mm	25 × 6 × 0.05
Laser spot size/mm	3
Standoff distance/mm	0.3, 0.6, 0.9
Laser energy/J	4, 4.5, 5

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 复板飞行距离对碰撞角度的影响

通常认为碰撞点处产生射流是实现有效的固相结合的必要条件。当复板与基板的碰撞角度过小时,射流会消失,将不能进行自清理,实现板料复合;碰撞角度过大,射流量将增大,会产生高度的表面净化。在研究爆炸焊接工艺时,Deribas<sup>[18]</sup>等人给出了动态碰撞角度的下限公式:

$$\theta_{\min} = K \sqrt{\frac{H_v}{\rho_f \cdot V_c^2}} \quad (1)$$

式中, K 为常数,取值在 0.6~1.2 之间,  $H_v$  为复板材料的维氏硬度,  $\rho_f$  为复板材料的密度,  $V_c$  为碰撞点的移动速度。

一般认为<sup>[19]</sup>,合理的高速冲击焊接过程中的动态碰撞角度为 5~25°,若超过这个范围,复板冲击速度无论多大都无法实现固态冶金结合。图 2 所示为激光高速冲击点焊过程中复板的塑性变形特征和碰撞角度的变化情况。对比图 2(a)和(b)可以发现,随着碰撞点由焊点中心沿着径向移动,碰撞角度逐渐增大( $\theta_{12} > \theta_{11}$ )。当复板飞行距离不同( $S_2 > S_1$ )时,冲击过程中碰撞角度的变化趋势遵循逐渐增大的规律( $\theta_{22} > \theta_{21}$ )。但由于飞行距离较大时,复板的塑性变形程度更大,相应的冲击过程中复板与基板的碰撞角度也更大( $\theta_{21} > \theta_{11}$ ,  $\theta_{22} > \theta_{12}$ )。

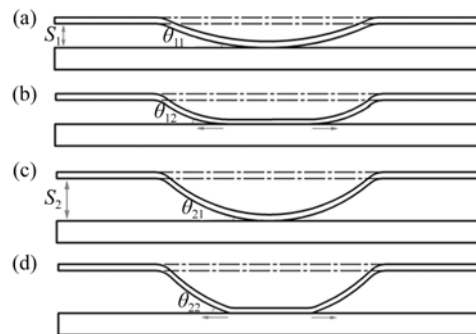


图 2 不同复板飞行距离下的碰撞角度

Fig. 2 Collision angle under different stand-off distance

#### 3.2 复板飞行距离对焊接表面形貌和焊接面积的影响

图 3 所示为激光光斑直径为 3 mm,脉冲能

量为 4.5 J, 复板飞行距离为 0.6 mm 时 Ti/Al 和 Cu/Al 焊点表面形貌。从图中可以清晰地看出, 焊点表面均出现了明显的回弹特征和环状焊接区域, 中心非连接区域类似于鼓包的回弹特征。此外, 同一焊接参数下 Cu/Al 组合的中心回弹区域面积要大于 Ti/Al 的情形, 且有效焊接区域面积更大, 其原因可能是 T2 紫铜软、塑性更好, 因此更容易产生回弹和塑性变形。

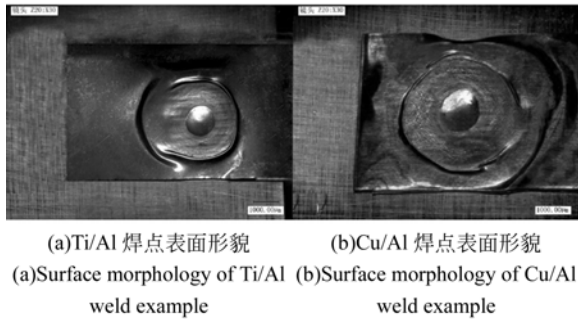


图 3 不同材料焊点表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of different weld example

图 4 和图 5 所示分别为根据焊点中心截面特征测量得到的 Ti/Al 和 Cu/Al 组合焊点中心非连接区域和环状焊接区域面积随复板飞行距离和脉冲激光能量变化的曲线。随着复板飞行距离增大, 环状焊接区域面积近似线性增大, 中心未连接区域面积逐渐减小。主要是由于随着复板飞行距离的增大, 复板塑性变形程度随之增大, 相应冲击过程中可达到的最大冲击角度也会增大。由于复板与基板的碰撞过程中冲击角度会先增大后减小, 随着最大冲击角度的增大可焊接冲击角度的范围也相应增大, 因此最终的焊接区域面积逐渐增大。而随着复板初始塑性变形程度的增大, 复板冲击角度从零增大到可焊接临界角的范围会减小, 因此中心非连接区域的面积会相应减小<sup>[15]</sup>。

#### 4 基于 SPH 方法的数值模拟

光滑粒子流体动力学 SPH 方法是一种基于拉格朗日算法的无网格数值模拟方法, 其基本思想是将连续的流体用相互作用的质点组来进行描述, 带有质量、密度等信息的离散粒子的运动可以看作是流场中流体的运动。此外, 无网格数值模拟方法可以避免在使用有限单元法进行模拟时的材料大变形和高应变率过程中可能会出现

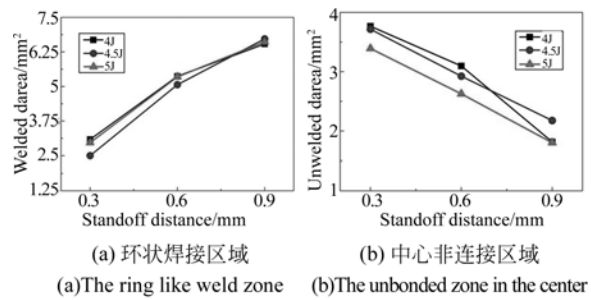


图 4 Ti/Al 焊接面积

Fig. 4 Weld area of Ti/Al

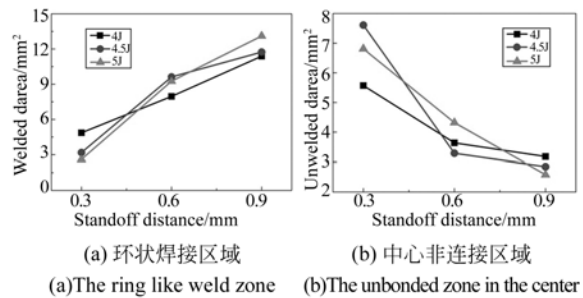


图 5 Cu/Al 焊接面积

Fig. 5 Weld area of Cu/Al

畸变或重构等影响计算精度的因素, 同时也有助于提高计算效率, 因此该方法在处理包括靶材贯穿大变形, 高速碰撞等问题时具有独特的优势。本文采用 AUTODYN 中的 SPH 方法对激光高速冲击点焊过程进行数值模拟。

在高速冲击点焊过程中, 复板受冲击加载发生了近似于球状凸起的塑性变形后与基板发生高速碰撞<sup>[2]</sup>。因此, 在基于 SPH 方法的数值模拟中将复板的几何模型简化成冲击状态自然形成理想化圆弧, 并建立碰撞初期复板和基板中心截面的二维平面模型, 其几何模型和相关参数如图 6 所示。数值模拟过程中, 粒子的大小决定了计算的时间及其稳定性, 同时也会影响界面波形貌和射流的形成。此处, 粒子的大小设为  $1 \mu\text{m}$ , 基板和复板的粒子总数超过 300 000。主要研究异种金属材料组合冲击点焊的数值模拟。模拟中使用 2 种不同金属材料组合: Cu/Al2024, Ti/Al2024; 设置 3 种不同飞行腔距离: 0.3、0.6 和 0.9 mm; 4 种不同的冲击速度: 400、600、800 和 1 000 m/s。此外, 由于自由边界条件允许应力波反射, 为达到与实际情况相符的良好效果, 将自由边界应用到模拟中。

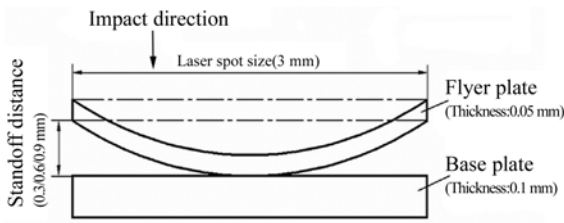


图 6 数值模拟模型的原理图

Fig. 6 Schematic diagram of simulation model

### 4.1 焊接过程

图 7 所示为模拟中复板和基板在不同时刻的焊接状态图。从图 7 中可以看出,随着复板与基板的碰撞点由中心沿着径向移动,碰撞角度逐渐增大。伴随着碰撞点的移动,当碰撞角度达到临界值时,在碰撞点处开始产生射流。随着冲击角度增大,射流量逐渐增多,同时基板的塑性变形也更加严重。此外,中心区域的复板与基板界面处的粒子并未结合,仅当冲击角度超过临界值后冶金结合才能发生,这与实验情形相吻合。

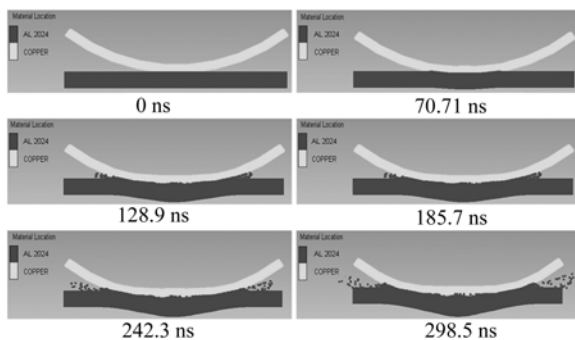


图 7 焊接过程模拟图

Fig. 7 Diagram of welding process

### 4.2 复板飞行距离对焊接的影响

图 8 所示为复板冲击速度为 1 000 m/s,飞行距离分别为 0.3, 0.6 和 0.9 mm 时, Cu/ Al2024 和 Ti/ Al2024 组合在不同时刻的材料状态图。从图 8 中可以清晰地看出,两种材料组合中,焊接界面的形貌逐渐由平直状过渡到微波状,最后变成漩涡状。产生射流的数量也随着复板飞行距离的增大逐渐增多。产生这种现象的根本原因是,随着复板飞行距离的增大,同一时刻复板与基板的碰撞角度逐渐增大。

通常,对于高速冲击焊接工艺,微波状连接具有更高的结合强度和焊接质量,是一种最佳的界

面结合形式<sup>[20]</sup>。通过数值模拟的方法验证发现 0.6mm 的复板飞行距离更加合理。与此同时,对比 Cu/Al2024 和 Ti/ Al2024 两种材料组合在相同工艺参数条件下的界面形貌,可以发现 Ti/Al2024 组合的波状界面更加规则明显。原因可能是焊接界面的形貌特征除了受冲击速度和碰撞角度的影响,也会受到材料类型的影响,由于金属 Ti 比 Cu 硬度值更大。因此, Ti/ Al2024 组合的硬度差值更大,高速冲击条件下的失稳效应也更加显著。

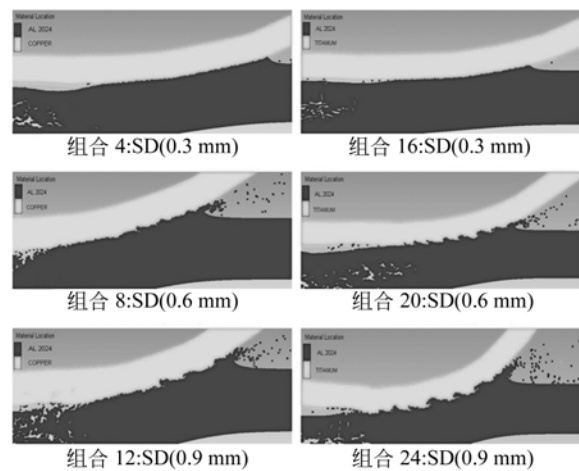


图 8 不同复板飞行距离条件下的材料状态图

Fig. 8 Diagram of material state under different standoff distance

图 9 和图 10 所示依次为模拟组合 2 和 6 的模拟结果与焊接试样中心截面解剖图的对比情况,冲击速度均设为 600 m/s,飞行距离分别为 0.3 和 0.6 mm。从图中可以发现,当飞行距离为 0.3 mm 时,复板中心没有明显的回弹,但未连接区域较大,模拟的结果和实验结果吻合。当复板飞行距离为 0.6 mm 时,焊点中心发生了较明显的回弹现象,中心的未连接区域和飞行距离较小时的情形相比大大减小,即实际焊接面积增大,此处的模拟结果与实验的结论也很吻合。

### 4.3 复板冲击速度对焊接的影响

一般来讲,复板飞行距离一定时,脉冲激光能量越大对应的复板冲击速度也越大。根据 zhang<sup>[14]</sup>等人的研究,激光诱导产生的冲击波驱动复板的速度达到了 475 m/s。由于受激光功率密度的限制,现有实验条件下复板还不能达到很高的速度。SPH 方法可以通过设置不同复板冲

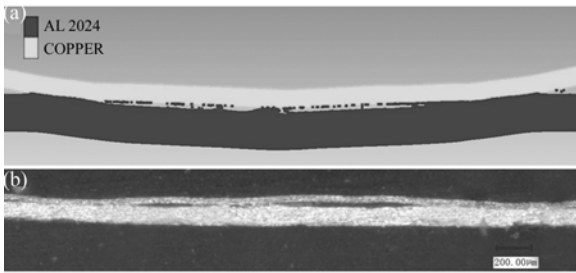


图 9 模拟组合 2 与实验的对比图

Fig. 9 Comparison diagram between combination 2 and the experiment

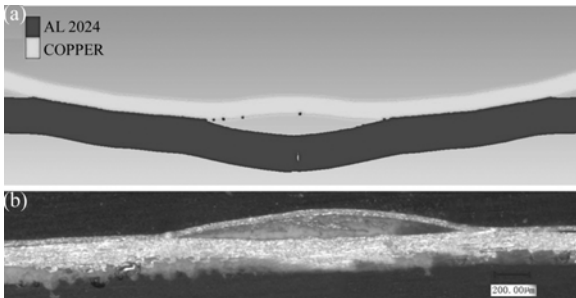


图 10 模拟组合 6 与实验的对比图

Fig. 10 Comparison diagram between combination 6 and the experiment

击速度来模拟不同激光能量大小。图 11 所示为复板飞行距离为 0.6 mm, 初始冲击速度分别为 600, 800 和 1 000 m/s 时, Cu/Al2024 和 Ti/Al2024 组合在不同时刻的材料状态图。从这两种材料组合的模拟结果中均可发现, 当复板的飞行距离一定时, 随着冲击速度的增大, 焊接界面的形貌逐渐由平直状过渡到微波状, 最后变成漩涡状, 即复板冲击速度的大小决定着界面波的形貌特征, 并且波形变化的趋势与相关文献<sup>[21]</sup>中的实验结果一致。

此外, 随着冲击速度的增大, 碰撞界面处产生的射流量逐渐增大。模拟过程中还发现产生射流的粒子源主要是 Al2024。当冲击速度逐渐增大时, 才有个别 Cu 和 Ti 的粒子受冲击作用产生射流。其原因可能是复板和基板材料的密度和硬度不同, 射流源主要来自于密度较低且硬度较小的材料。随着冲击速度的逐渐增大和射流不对称性降低, 密度较高的材料才开始成为射流来源<sup>[16]</sup>。由于在激光高速冲击点焊的过程中冲击角度逐渐增大, 理论上波状界面的振幅和周期也会随之增大。

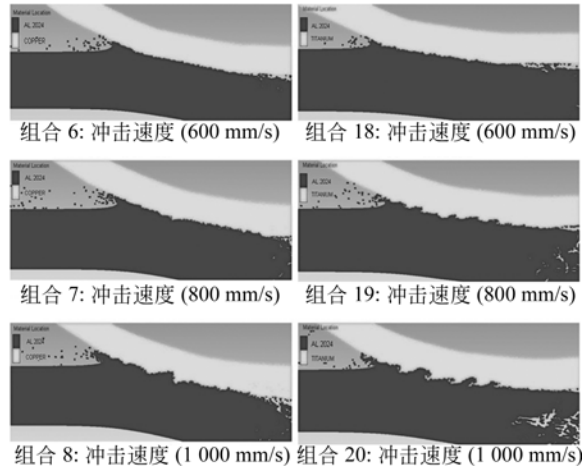


图 11 不同冲击速度条件下的材料状态图

Fig. 11 Diagram of material state under different impact velocity

#### 4.4 剪切应力和有效塑性变形分析

为测量复板与基板材料中心未连接区域和两侧结合区域的剪切应力和有效塑性变形随时间变化的情况, 分别选取两组位于复板与基板中心和一侧材料边缘的相对粒子为高斯点。

如图 12 所示, 未连接区域的 Gauge # 1, 2 在碰撞初始阶段其剪切应力方向相同, 而焊接区域的 Gauge # 3, 4 在碰撞的初始阶段其剪切应力方向相反。发现结合区域的应力值要远大于未结合区域, 并且复板材料剪切应力的绝对值要略大于基板材料, 该模拟结果与相关文献<sup>[17, 22]</sup>模拟中得到的结论一致。

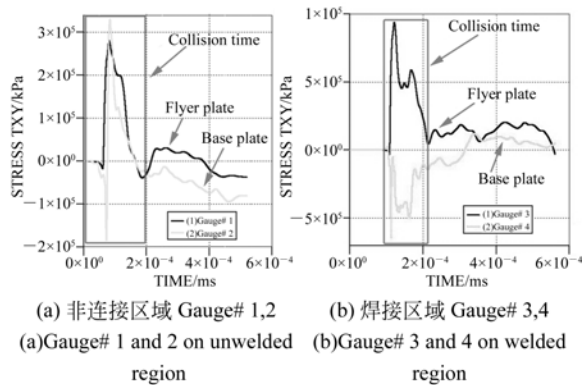


图 12 模拟组合 6 的剪切应力曲线

Fig. 12 Shear stress profile for combination 6

相关文献研究<sup>[1, 17, 21]</sup>显示, 复板与基板结合界面处的有效塑性变形必须大于 0.4 才能够实现

固态冶金结合。如图 13 所示,未连接区域的 Gauge # 1,2 在碰撞初始阶段其有效塑性变形均低于阈值,而焊接区域的 Gauge # 3,4 在碰撞初始阶段其有效塑性变形值超过了有效塑性变形阈值,并且结合区基板的有效塑性变形更大。综合上述剪切应力和有效塑性变形随时间的变化情况可以发现,碰撞速度一定时,复板与基板的冲击角度直接决定了剪切应力和有效塑性变形的大小和方向。未连接区域在焊接初始阶段冲击角度很小,因此剪切应力和有效塑性变形值都很小,并且剪

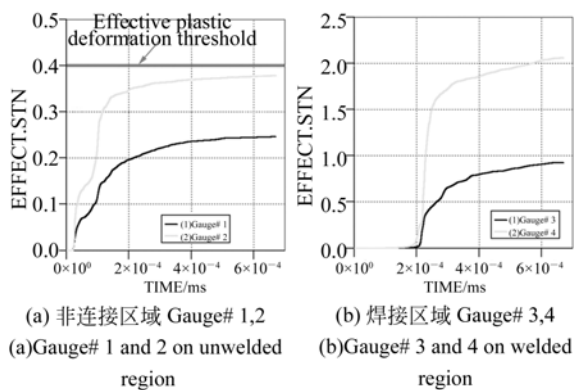


图 13 模拟组合 6 的有效塑性变形曲线

Fig. 13 Effective plastic strain profile for combination 6

切应力方向相同。随着冲击角度逐渐增大,焊接区域的剪切应力和有效塑性变形值均有了显著提高,而且剪切应力呈相反的趋势<sup>[16,17]</sup>。该模拟结果再次证明,仅当复板与基板的碰撞角度超过某一临界值时,固态焊接才有可能发生。

## 5 结 论

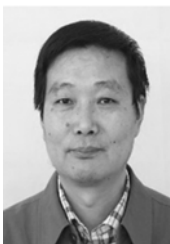
本文采用实验研究和数值模拟相结合的方法对激光高速冲击点焊过程的主要工艺参数,包括复板飞行距离、碰撞角度和冲击速度,实验研究了 Cu/Al, Ti/Al 组合在 0.3、0.6 和 0.9 mm 三种复板飞行距离和 4、4.5 和 5 J 三种激光脉冲能量条件下的冲击点焊工艺,发现随着复板飞行距离的增大,冲击过程中复板与基板的碰撞角度也增大,中心区域出现明显的回弹特征,中心非连接区域的面积会相应减小,焊接区域面积则逐渐增大。模拟结果显示复板飞行距离和冲击速度增大时,焊接界面的形貌逐渐由平直状过渡到微波状,最后变成漩涡状,验证发现 0.6mm 的复板飞行距离得到的微波状连接是最佳的界面结合形式。此外,结合区域的剪切应力方向相反,且有效塑性变形超过 0.4 是形成金属有效连接的条件。

## 参考文献:

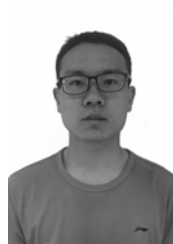
- [1] CHIZARI M, AL-HASSANI S S, BARRETT L M, *et al.*. Experimental and numerical study of water jet spot welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198(1-3):213-219.
- [2] TURGUTLU A, AL-HASSANI S S, AKYURT M. Experimental investigation of deformation and jetting during impact spot welding[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16(5-6):789-799.
- [3] SALEM S A. *Some aspects of liquid/solid interaction at high speeds*[D]. Columbus: UMIST, 1980.
- [4] TURGUTLU A, AKYURT M. Spot welding of foils by water jets[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1997, 22(1):143-148.
- [5] TURGUTLU A, AL-HASSANI S S, AKYURT M. The influence of projectile nose shape on the morphology of interface in impact spot welds[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(6):657-669.
- [6] 王霄, 邱唐标, 顾宇轩, 等. 激光间接冲击下钛箔的微成形特性[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3):632-638.  
WANG X, QIU T B, GU Y X, *et al.*. Micro-forming properties of Ti foil under laser indirect shock[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):632-638. (in Chinese)
- [7] 刘会霞, 张强, 顾春兴, 等. 激光驱动飞片微塑性温成形实验研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(7):0703011.  
LIU H X, ZHANG Q, GU CH X, *et al.*. Experimental investigation on warm micro-forming by laser-driven flyer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2014, 41(7):0703011. (in Chinese)
- [8] 周建忠, 戴磊, 黄舒, 等. 激光冲击驱动飞片成形性能[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7):1743-1750.  
ZHOU J Z, DAI L, HUANG S, *et al.*. Formation of laser shock-induced high speed flyers[J]. *Opt.*

- Precision Eng.*, 2014, 22(7):1743-1750. (in Chinese)
- [9] 王霄,张迪,顾春新,等. 激光冲击软模大面积微弯曲成形方法[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(9):2292-2298.
- WANG X, ZHANG D, GU C X, *et al.*. Large area micro bending method by soft punch under laser shock wave based on multi-groove mold[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2292-2298. (in Chinese)
- [10] 陆萌萌,刘会霞,沈宗宝,等. 激光驱动飞片复杂轮廓多孔微冲裁实验及模拟[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0403004.
- LU M M, LIU H X, SHEN Z B, *et al.*. Experiment and simulation of multihole micro-punching with complex layouts by laser-driven flyer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2014, 41(4): 0403004. (in Chinese)
- [11] LIU H X, SHEN Z B, WANG X, *et al.*. Feasibility investigations on a novel micro-embossing using laser-driven flyer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1987-1991.
- [12] BARRADAS S, GUIPONT V, MOLINS R, *et al.*. Laser shock flier impact simulation of particle substrate interactions in cold spray[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, 16(4): 548-556.
- [13] DAEHN G S, LIPPOLD J C. Low temperature spot impact welding driven without contact[P], US 8084710 B2, 2009.
- [14] ZHANG Y, BABU S S, PROTHE C, *et al.*. Application of high velocity impact welding at varied different length scales[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(5):944-952.
- [15] 顾宇轩,王霄,沈宗宝,等. 基于强脉冲激光的 Ti/Al 冲击点焊实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0503003.
- GU Y X, WANG X, SHEN Z B, *et al.*. Experimental study of Ti/Al impact spot welding by intense laser pulse induced shock waves[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5):0503003. (in Chinese)
- [16] WANG X, ZHENG Y Y, LIU H X, *et al.*. Numerical study of the mechanism of explosive/impact welding using smoothed particle hydrodynamics method[J]. *Materials & Design*, 2014, 35: 210-219.
- [17] WANG X, GU Y X, QIU T B, *et al.*. An experimental and numerical study of laser impact spot welding [J]. *Materials & Design*, 2015, 65: 1143-1152.
- [18] GODUNOV S K, DERIBAS A A, ZABRADIN A V, *et al.*. Hydrodynamic effects in colliding solids [J]. *Computational Physics*, 1970, 5:517-539.
- [19] 郑远远. 高速冲击下金属焊接能力的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- ZHENG Y Y. *Research on Metal Welding by High Velocity Impact*[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012.
- [20] 王耀华. 金属板材爆炸焊接研究与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- WANG Y H. *Research and practice of explosive welding of metal plates*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [21] MOUSAVI A A, BURLEY S J, AL-HASSANI S S. Simulation of explosive welding using Williamsburg equations of state to model low detonation velocity explosive [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(6):719-734.
- [22] AKBARI-MOUSAVI S A, BARRETT L M, AL-HASSANI S S. Explosive welding of metal plates [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 202(1):224-239.

#### 导师简介:



王 霄(1964—),男,陕西武功人,硕士,教授,1986年于陕西工学院获得学士学位,1995年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事激光先进制造技术、数字化设计与制造等方向的研究。  
E-mail: wx@ujcs.edu.cn



张洪峰(1991—),男,浙江兰溪人,硕士研究生,2013年于嘉兴学院获得学士学位,主要从事激光冲击焊接等方面的研究。E-mail: 15068215948@163.com