

基于强脉冲激光的Ti/Al冲击点焊实验研究

顾宇轩 王 霄 沈宗宝 邱唐标 马友娟 张 迪 刘会霞

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 提出了一种可以实现同种或异种金属材料固态冶金结合的新型激光冲击点焊工艺。实验中,采用Nd:YAG激光器发出的脉冲激光驱动厚度为30 μm 的钛箔产生局部塑性变形,并以超高速撞击厚度为100 μm 的铝板以实现点焊连接。当钛箔的飞行距离分别为0.3、0.6、0.9 mm时,焊点中心的回弹区域面积依次减小,而结合区域面积依次增大。采用冷镶嵌技术制样用来观察焊点的截面特征,发现了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。为研究激光冲击点焊对材料力学性能的影响,应用纳米压痕测试技术测量了垂直于焊接界面方向材料的显微硬度,结果表明焊接界面附近材料的硬度值明显提高。此外,焊接试样的拉伸剪切测试结果表明,当复板和基板发生有效固态冶金结合时其连接强度较高,失效形式通常是焊点边缘破裂。激光冲击点焊为厚度在微米级的异种金属箔板的点焊连接开辟了新途径。

关键词 激光技术; 激光冲击点焊; 飞行距离; 焊接界面; 纳米压痕硬度; 拉伸剪切强度

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0503003

Experimental Study of Ti/Al Impact Spot Welding by Intense Laser Pulse Induced Shock Waves

Gu Yuxuan Wang Xiao Shen Zongbao Qiu Tangbiao Ma Youjuan

Zhang Di Liu Huixia

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract A novel laser impact spot welding process is proposed, during which solid state and metallurgical bonding of similar or dissimilar metal combinations can be obtained. In the experiment, the laser pulse is launched from a Nd:YAG laser to induce the Ti foil in the thickness of 30 μm to bulge and collide to the 100 μm thickness Al plate with high speed to get spot joint. When the standoff distances of the Ti foil are 0.3, 0.6, 0.9 mm, respectively, the springback area at the center of the weld spot decreases, and the bonding area increases gradually. The cold inlaid technique is used to fix the weld examples for studying the cross-sections features of the weld spot, and wavy interface with the alternative amplitude and period along the diameter direction of the weld spot and the straight weld interface are observed. In order to investigate the influence of laser impact spot welding on the mechanical properties of the materials in the weld zone, the nanoindentation hardness test is applied across the weld interface. It is found that the microhardness in the weld interface region increases obviously. Moreover, the results lap shear strength test show the bonding strength of weld spot is relatively fine when effective solid-state and metallurgical bond is obtained during welding, and the failure usually occurs at the edge of the weld spots. Laser impact spot welding provides a new way for dissimilar metal foils welding in the thickness of micro level.

Key words laser technique; laser impact spot welding; standoff distance; weld interface; nanoindentation hardness; lap shear strength

OCIS codes 140.3538; 000.2170; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2014-10-10; 收到修改稿日期: 2014-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(51175235)、江苏省自然基金(BK2012712)、江苏省高校自然科学基金(13KJB460003)

作者简介: 顾宇轩(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。

E-mail: guyuxuan0214@163.com

导师简介: 王 霄(1964—),男,教授,主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。

E-mail: wx@ujs.edu.cn(通信联系人)

1 引言

高速冲击点焊技术可以实现同种或异种金属材料的点状固态冶金结合,相比于应用极为广泛的电阻点焊和激光点焊技术,其最大的优势在于焊接之后很少存在热影响区和金属间化合物,因此焊接结合处不会存在因为强度减弱或者残余应力而导致的裂纹、锈蚀等问题^[1-2]。此外,高速冲击点焊技术不受材料熔点、热膨胀和热传导等性质的影响,即使熔点相差很大的金属也可以实现有效连接。根据冲击加载的方式不同,高速冲击点焊技术可以分为爆炸点焊^[3]、水射流冲击点焊^[4]和弹丸冲击点焊^[5],其中水射流冲击点焊和弹丸冲击点焊均采用接触式加载,焊点表面常常会出现裂纹,极大地影响了焊接质量。并且焊点的直径受制于水柱和弹丸的尺寸,很难实现动态改变。爆炸点焊则常应用于复板较厚的情形,并且安全性和可控性较差^[3]。

传统的高速冲击点焊技术主要针对厚度在 100 μm 以上材料的固态连接,对于厚度尺度在 100 μm 以下的箔板并不适用。而随着微系统技术(MST)和微机电系统(MEMS)的迅速发展,微器件在航空航天、生物医学、通讯、电子、精密仪器等领域的应用越来越广泛^[6-7],与之相关的微型材料结合技术的研究显得越来越重要。近年来,激光诱导冲击波驱动飞片作为一种新型冲击加载方式以其超高速(大于 200 m/s),超高应变率($10^6\sim 10^7\text{ s}^{-1}$),输入能量低和可控性好的特点成为了新的研究热点^[8-11],并被广泛应用于微冲裁^[12-13],微弯曲^[14]和微压印^[15]等新型工艺之中。

本文基于激光诱导冲击波加载的特点和高速冲击点焊的一般原理提出了一种新型的激光冲击点焊工艺。实验研究了厚度为 30 μm 的钛箔和 100 μm 的铝板在 0.3、0.6、0.9 mm 3种复板飞行距离和 4、4.5、5 J 三种激光脉冲能量条件下的冲击点焊工艺。使用冷镶嵌技术制样来观察焊接试样的截面特征,并测量了垂直于材料结合界面方向的纳米压痕硬度分布。最后通过拉伸剪切测试了激光冲击点焊试样的机械强度并进行讨论。

2 实验原理与装置

2.1 实验原理

高速冲击点焊技术遵循冲击焊接的基本原理。当复板和基板发生有角度高速碰撞时,会在焊接界面产生强塑性变形,当冲击产生的应力高于材料的屈服强度时,在碰撞点位置会发生材料喷射现象,清除待焊接表面的氧化物,并在极高的冲击压力下使上下层焊接材料界面距离达到原子间距,最终实现固态冶金结合。

图 1 所示为激光冲击点焊的原理图。实验中,采用厚度为 3.6 mm 具有良好透光性和抗冲击韧性的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料做约束层,并在 PMMA 表面喷涂一层黑漆以增加对激光吸收率。强脉冲激光束透过约束层辐照在黑漆上会发生局部升温、熔融、气化和喷溅等物理现象。当激光功率密度达到 $10^8\sim 10^9\text{ W/cm}^2$ 时,表层材料将迅速气化并继续吸收激光能量产生等离子体;若激光功率足够大,则会点燃等离子体形成激光诱导的爆轰波^[16],等离子体爆轰波将在几百纳秒时间内产生吉帕量级冲击压力作用在复板上。复板受强冲击波作用会发生局部塑性变形并以超高速撞击基板,当冲击角度和碰撞速度超过一定阈值,便可在强塑性变形的作用下实现固态冶金连接。为防止等离子体泄露,采用脲基丙烯酸酯粘合剂(乐泰 380)将复板和 PMMA 紧密粘结。

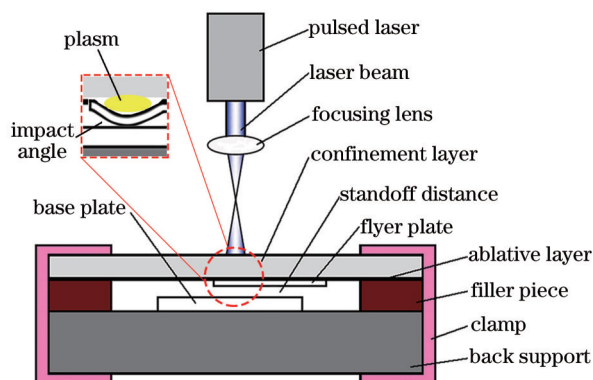


图 1 实验原理图

Fig.1 Schematic diagram of experiment

2.2 实验装置

实验装置如图 1 所示。实验中,采用厚度为 100 μm 的工业纯铝做基板,厚度为 30 μm 的工业纯钛做复板。基板和复板的尺寸分别设计为 40 mm \times 20 mm 和 30 mm \times 6 mm,焊接前,采用粒度为 2000 目的砂纸打磨基板和复板的待焊接表面去除氧化层,并用无水酒精将其擦拭晾干。激光器采用能量呈高斯分布的灯泵大能量 Nd:YAG 脉冲激光器,主要性能参数如表 1 所示。通过调整聚焦透镜和实验装置之间的距离控制光斑直径为 3 mm。为了研究复板飞行距离对焊接性能的影响,将 0.43、0.73、1.03 mm 三种不同厚度的垫片置于复板和基板之间,其对应的复板飞行距离分别是 0.3、0.6、0.9 mm。冲击速度是高速冲击点焊的关键工艺参数,实验中采用 4、4.5、5 J 三种脉冲激光输入能量来控制初始的等离子体冲击波的驱动压力,从而改变复板与基板的碰撞速度。此外,采用黑胶带将基板紧密固定于焊接载台,整个实验装置用燕尾夹夹紧。

表 1 激光器主要相关参数

Table 1 Main parameters of the laser

Wavelength /nm	Pulse energy /J	Pulse width /ns	Frequency /Hz
1064	2~8	10	1

3 实验结果与分析

3.1 焊接试样

图 2 所示为激光脉冲能量为 4.5 J,复板飞行距离分别为 0.3、0.6、0.9 mm 时的焊接试样和局部放大图。由实验结果可知,激光脉冲能量一定时,复板飞行距离对焊点的表面形貌和焊接尺寸有较大影响。如图 3(a) 所示,当复板的飞行距离达到 0.6 mm 时,焊点中心出现回弹区域和环状的焊接区域。如图 2(d)和(f)所示,通过测量特征区域的直径尺寸发现,随着复板飞行距离的增大,中心回弹区域的直径减少而整体焊点的尺寸增大。然而,当复板飞行距离为 0.3 mm 时,如图 2(a)和(b)所示,焊点表面较为平整,中心不存在明显的回弹特征和塑性变形。

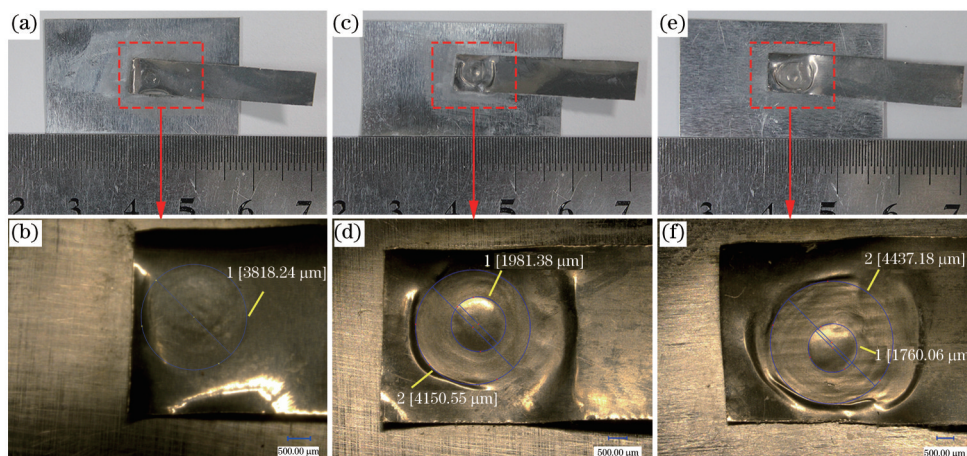


图 2 不同飞行距离的焊接试样及其局部放大图。(a),(b) 0.3 mm; (c),(d) 0.6 mm; (e),(f) 0.9 mm

Fig.2 Weld examples and its partial enlarged drawing under different distances. (a),(b) 0.3 mm; (c),(d) 0.6 mm; (e),(f) 0.9 mm

上述特征形貌产生的原因主要是,根据高速冲击焊接的理论,当冲击角度处在 $5^\circ\sim 25^\circ$ 时,碰撞点处才会由于强塑性剪切变形作用产生射流清洗材料表层,并在高压作用下实现固态连接^[17],焊接初始阶段,复板发生局部塑性变形并与基板碰撞的初始冲击角度很小(近似为零)。因此焊点的中心会存在未连接区域。基板固定于焊接平台可以视作固定端,根据冲击波传播原理,复板以高速撞击基板产生的冲击波会反射作用于复板的变形表面。由于复板的厚度很薄,当冲击速度超过某一阈值,而碰撞角度又很小时(小于 5°),反作用于复板表面的冲击应力超过复板材料的屈服强度便会驱使其产生局部回弹。此外,复板的驱动过程存在加速和匀速两个阶段,随着飞行距离的增大,复板与基板的最终碰撞速度也会随之增大。当飞行距离较大(0.6 mm 和 0.9 mm)时,复板所获得的冲击动能更大,因此回弹特征也更为明显。随着焊接过程的进行,复板与基板的冲击角度逐渐增大,当达到某一临界角(大于 5°)后,在强塑性变形和强剪切应力的共同作用下便可实现固态

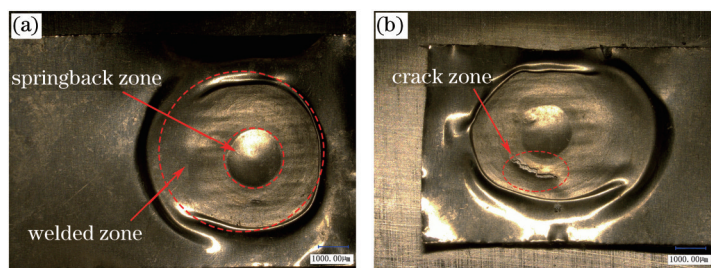


图3 复板飞行距离为0.6 mm时焊点形貌图。(a) 焊接试样表面形貌; (b) 复板破裂失效

Fig.3 Topography of welding spot with standoff distance of 0.6 mm. (a) Surface morphology of the weld example; (b) crack failure of the flyer plate

连接,因此会存在环状的焊接区域。

图4(a)所示为激光脉冲能量为4.5 J,复板飞行距离分别为0.3、0.6、0.9 mm时的焊点中心截面解剖图。从图中可以明显看出,随着复板飞行距离的增大,焊点中心非连接区域的回弹特征越发明显,其直径尺寸逐渐减小。图4(b)所示为根据焊点中心截面特征测量得到的非连接区域和环状焊接区域的面积。由曲线图可以发现,随着复板飞行距离的增大,环状焊接区域的面积呈近似线性增大,中心的未连接区域面积逐渐减小。原因主要是:随着复板飞行距离的增大,其塑性变形的程度随之增大,相应冲击过程中可达到的最大冲击角度也会增大^[5]。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角度的范围会减小,因此中心非连接区域的面积会随之减小。当脉冲激光能量达到5 J,复板飞行距离为0.9 mm时,如图3(b)所示,复板材料会由于超过自身成形极限和过大冲击应力而发生局部破裂失效。

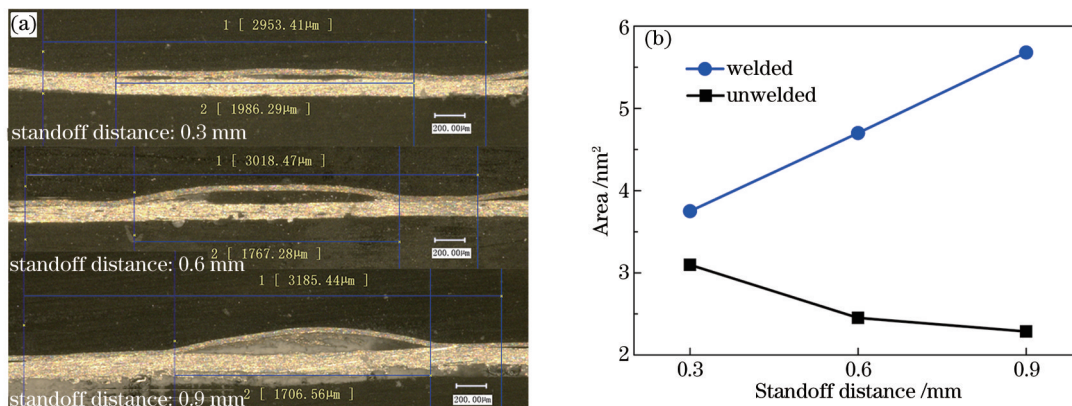


图4 (a) 焊点中心截面解剖图; (b) 非连接区域和焊接区域面积

Fig.4 (a) Cross-sections of the central spot joint; (b) un-bonded and welded areas

3.2 焊接界面

将环氧树脂和固化剂按质量比3.5:1配比,将焊接试样从焊点边缘处裁剪后制样。待冷镶嵌试样固化,分别在粒度为400、800、1200、2000、2500目的砂纸上打磨至焊点中心位置,采用粒度为0.5 μm的金刚石研磨膏对试样进行抛光处理,并在真实色共聚焦显微镜(Axio CSM 700)下观察形貌特征。

图5所示为脉冲激光能量为4.5 J,复板飞行距离为0.6 mm时的焊接界面和局部放大图。由图中可以看出焊点中心的回弹区域和环状的焊接界面。从图5(b)和(c)所示的焊接界面放大图中可以清晰地看到高速冲击焊接中典型的波形焊接界面和平直型焊接界面。因此可推测,激光冲击点焊和爆炸焊接及电磁脉冲焊接具有相似的结合机理,只是由于冲击速度较低(大约200 m/s),复板的厚度处于微米级,焊接界面波形显得不规则。此外,由图5(b)和(c)也可以发现焊接界面区域附近的材料不存在热影响区和金属间化合物,因此焊接结合区金属的力学性能得到较好的保证,其原因主要是激光诱导冲击波驱动复板加载应变率极高(可达 10^7 s^{-1}),整个焊接过程通常在几百纳秒时间内完成,由复板动能转化的内能不足以使焊接材料达到相应的熔点。同

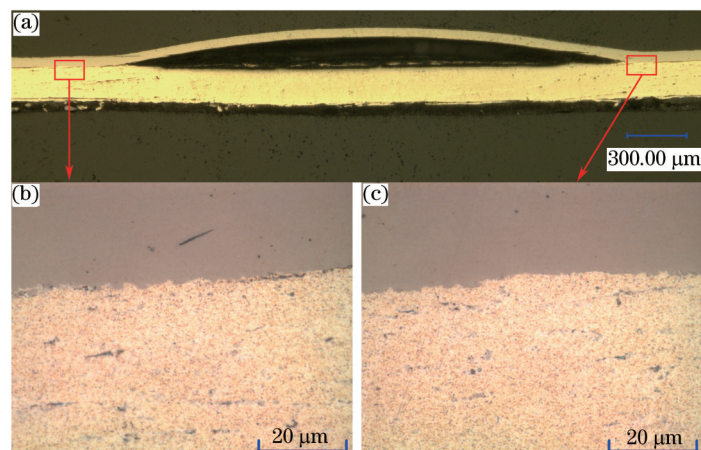


图5 显微镜观察焊接界面。(a) 焊接界面形貌; (b) 波形焊接界面; (c) 平直形焊接界面

Fig.5 Observation of welding interface. (a) Morphology of the weld interface; (b) wavy weld interface; (c) plain weld interface

时,相比于爆炸焊接和电磁脉冲焊接,激光冲击驱动的复板尺度和碰撞能量也小得多。

图6(a)所示为Ti/Al焊接界面的局部放大图,从图中可以看到沿焊点直径方向振幅和周期变化的界面波形。产生该现象的原因主要是:复板受冲击波作用发生局部塑性变形,与基板发生高速碰撞到焊接结束的过程中,冲击角度理论上从零动态变化至最大值最后又趋于零。然而,该波形的变化相比于其他高速冲击点焊的波形特征并不规则,其原因可能是由于在冲击角度动态变化的过程中,碰撞速度并没有达到一个稳定值。对于高速冲击焊接波形界面产生的原因有很多解释,包括:复板流侵入机理^[18]、涡街机理^[19]、亥尔姆霍尔兹失稳机理^[20]及应力波机理^[21]等,但是并没有普遍统一的理论,对于激光驱动冲击焊接更没有做过系统的研究。不过由图6(b)可发现回弹区域边缘存在开裂现象,其原因可能是在碰撞点处产生的压缩波传播到基板底部与对面的压缩波相遇,反射回焊接界面形成拉伸波,作用于焊接结合界面,当拉伸波的力量足够大时,可以将刚结合的界面撕裂。基于此现象,激光冲击点焊的界面波形产生的原理更倾向于应力波机理,即碰撞点出现的压缩波会产生透射和连续的反射,压缩波反射为拉伸波并周期地在碰撞点前后与界面相遇形成新的扰动源,随着碰撞点的前移产生连续的表面不稳定源。

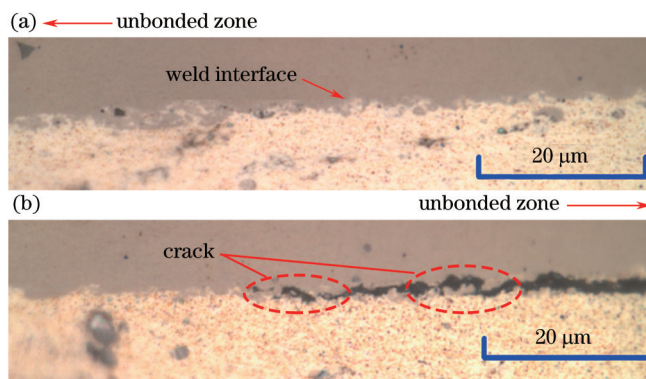


图6 Ti/Al焊接界面。(a) 焊接界面波形图; (b) 未连接区域处的裂纹

Fig.6 Welding interface between Ti and Al. (a) Morphology of wavy interface; (b) crack on no bonding zone

3.3 纳米压痕硬度测试

复板和基板发生有角度高速碰撞时,会在碰撞点处产生强塑性变形,同时结合界面附近的材料也会发生一定程度的塑性变形,其对焊接区域材料的强度和硬度,甚至物理化学性能都会有影响。实验中,采用瑞士CSM公司CPX+NHT+MST型纳米压痕测试仪测量焊接界面区域材料的显微硬度,实验装置如图7(a)所示。测试时,最大载荷 F 设为8 mN,加载速度和卸载速度设为16 mN/min,保压时间为10 s,图7(b)所示为加载卸载曲线和压痕深度曲线。为了测量垂直于焊接界面方向材料塑性变形对其显微硬度的作用,考虑到压头加载对材料硬度的影响,因此选取垂直结合界面方向每隔5 μm 为测试点位,测试结果取测试点水平方向

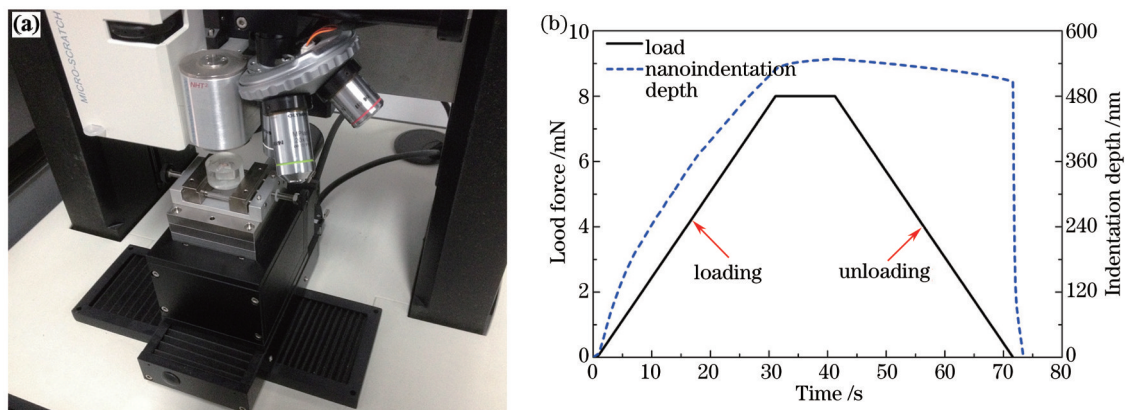


图7 (a) 纳米压痕硬度测试装置; (b) 纳米压痕加载、卸载和深度曲线

Fig.7 (a) Nanoindentation hardness measurement setup; (b) nanoindentation loading, unloading and nanoindentation depth curve

3个点位测量值的平均值。

图8所示为Ti/Al焊接界面区域显微硬度的分布曲线。从图中可以看出,随着测试点的位置由外向里趋向焊接界面,Ti和Al的显微硬度值均呈逐渐增大的趋势,其中Al在结合界面附近(测试点A)的硬度值较原材提高了26.7%,Ti在结合界面附近(测试点A')的硬度较原材料提高了22.4%,而焊接界面处(测试点O)的硬度值也达到了2484.381 MPa。因此,激光冲击点焊相比于熔化点焊(电阻点焊和激光点焊),焊接结合区的材料力学性能有了较大的提高。其原因一方面是,复板与基板高速碰撞所引起的不同程度的塑性变形,焊接的过程中发生了类似于加工硬化的强化作用。另一方面,激光冲击点焊具有高应变率加载的特性,碰撞过程中,焊接界面区域的材料会发生位错缠结,形成孪晶,晶粒细化等现象,这些材料显微组织的变化会极大地提高材料的硬度和强度^[22]。也有研究者认为,复板和基板的碰撞过程中会产生大量的热,由于整个焊接过程极短,结合界面处的材料经历了快速加热又快速冷却的过程,相当于接受淬火处理,也会导致显微硬度的提高^[23]。

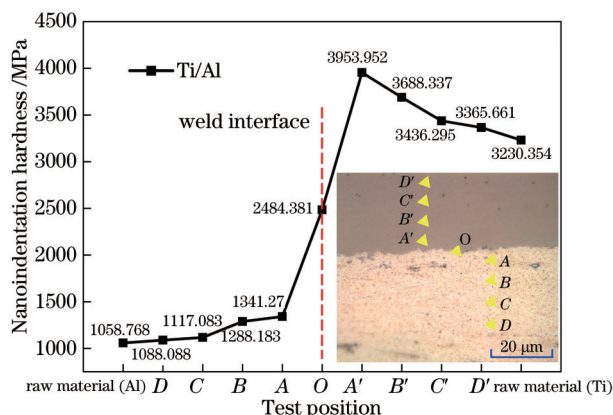


图8 Ti/Al焊接界面区域的纳米压痕硬度分布

Fig.8 Distribution of nanoindentation hardness for the weld interface region of Ti/Al

3.4 拉伸剪切强度测试

实验中,采用微机控制电子万能试验机(Instron Type UTM 4104)进行拉伸剪切测试,研究焊接区域的机械强度和破坏形式,测试原理如图9所示。本文着重研究了复板飞行距离为0.6 mm和0.9 mm时的情形,其中拉伸速率设置为0.2 mm/min。

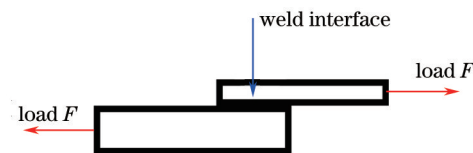


图9 拉伸剪切强度测试示意图

Fig.9 Illustration of lap shear strength test

图 10 所示为拉伸剪切测试后焊接试样的失效情况。从图中可以发现,激光冲击点焊试样的拉伸剪切破坏通常有两种形式,分别为焊接区域失效,如图 10 (a)和(b)中试样所示,以及焊点边缘破裂,如图 10(c)和(d)中试样所示。图 11 所示为上述情形中对应的拉伸剪切测试的力—位移曲线图。其中,图 10(a)和(b)试样发生失效时达到的最大拉力分别为 23.82 N 和 33.65 N;图 10(c)和(d)试样发生失效时的最大拉力则达到了 59.34 N 和 50.51 N。上述两种失效形式产生的因素主要取决于实际固态连接区域的面积和焊接界面形貌,通常有效固态连接区域面积越大,焊接界面为波浪状则焊接区域具有更高的连接强度。

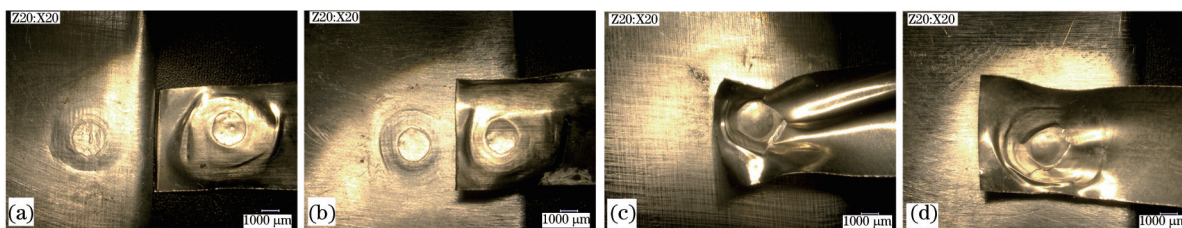


图 10 拉伸剪切测试后的焊接试样。(a) 激光能量为 4.5 J,复板飞行距离为 0.6 mm;(b) 激光能量为 5 J,

复板飞行距离为 0.6 mm;(c) 激光能量为 4 J,复板飞行距离为 0.6 mm;(d) 激光能量为 4.5 J,复板飞行距离为 0.9 mm

Fig.10 Weld examples after lapping test. (a) Laser energy is 4.5 J and the standoff distance is 0.6 mm; (b) laser energy is 5 J and the standoff distance is 0.6 mm; (c) laser energy is 4 J and the standoff distance is 0.6 mm; (d) laser energy is 5 J and the standoff distance is 0.9 mm

由拉伸剪切测试的力—位移曲线可以发现,焊接试样的拉伸破坏形式和焊接工艺参数缺少规律性,复板飞行距离为 0.6 mm 时,激光脉冲能量为 4.5 J 和 5 J 的焊接试样受拉伸作用均发生焊接区域失效,当激光脉冲能量为 4 J 时,理论上复板的冲击速度和焊接效果均要差于激光脉冲质量为 4.5 J 和 5 J 的情形,但是其连接强度反而更高。产生该现象的原因可能有两点:1)由于复板和约束层之间的粘紧力,等离子体的泄露,吸收层的厚度和激光光斑的对中等问题很难精确控制,因此即使工艺参数相同时焊接效果也会存在差异;2)复板飞行距离一定时,激光脉冲能量越大,驱动复板的动能也越大,同时中心区域的回弹作用更明显,焊接界面受到拉伸波作用也会更大,这样会直接影响有效焊接面积和连接效果。如果用焊点表面环状焊接区域的面积作为近似的固态连接区域面积,用最大拉力除以该面积计算其拉伸剪切强度,可以得到当复板飞行距离为 0.6 mm,脉冲激光能量分别为 4、4.5、5 J 时,其对应的连接强度分别为 5.88、2.52、3.38 MPa,可以发现焊点边缘破裂的试样其连接强度要远大于焊接区域失效的情形。所以,当复板和基板发生有效的固态冶金结合时,其焊接区域的拉伸剪切强度较高,焊点边缘则由于和基板发生高速碰撞,受到局部剪切变形作用产生应力集中,会率先发生破裂失效。

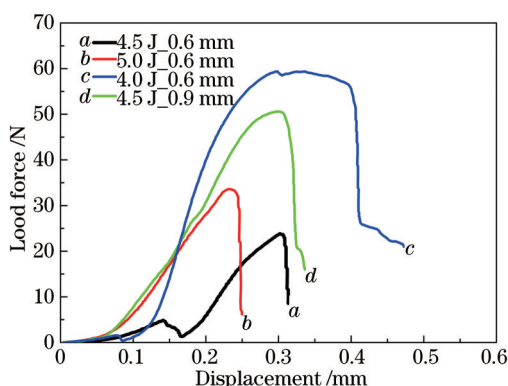


图 11 拉伸剪切测试的力—位移曲线

Fig.11 Force and displacement curve of lap shear test

4 结 论

提出了一种基于强脉冲激光诱导冲击波驱动的高速冲击点焊技术,实验采用尺寸为 3 mm 光斑,研究了 0.3、0.6、0.9 mm 三种复板飞行距离和 4、4.5、5 J 三种脉冲激光能量下的 Ti/Al 冲击点焊工艺。使用冷镶嵌技术制样,用于观察焊接试样的截面特征,并测量了垂直于材料结合界面方向的纳米压痕硬度分布。此外,本

文还利用过拉伸剪切测试研究了激光冲击点焊试样的机械强度。通过上述讨论可以得出如下结论:

1) 当复板飞行距离超过某临界值时,焊点中心会出现回弹区域和环状焊接区域,并且随着复板飞行距离的增加,焊点中心的未连接区域面积会逐渐减小,而最终的焊接面积逐渐增大。

2) Ti/Al焊接结合面同时出现了波型界面和平直型界面特征。由于受到动态变化的冲击角度的影响,波型焊接界面的周期和振幅沿焊点的直径方向变化。焊点回弹区域的边缘存在结合界面开裂现象,因此激光冲击点焊界面波形的产生原因可以用应力波机理解释。此外,焊接界面区域并不存在金属间化合物和热影响区。

3) 焊接界面区域材料的显微硬度较原材料会有一定程度的提高,产生这种变化的原因,一方面由于强塑性变形的影响,另一方面由于高应变率冲击作用下结合面处的材料会产生晶粒细化,位错缠结等显微组织的变化。

4) 拉伸剪切测试结果表明,当复板和基板发生有效固态冶金结合时,连接强度较高,失效形式通常是焊点边缘破裂,其在一定程度上会影响激光冲击点焊的连接强度。

参 考 文 献

- 1 Palmer T A, Elmer J W, Brasher D, *et al.*. Development of an explosive welding process for producing high-strength welds between niobium and 6061-T651 aluminum[J]. *Welding Journal*, 2006, 85(11): 252-263.
- 2 Ben-Artzy A, Stern A, Frage N, *et al.*. Interface phenomena in aluminium magnesium magnetic pulse welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(4): 402-408.
- 3 Crossland B. *Explosive Welding of Metals and Its Application*[M]. New York: Oxford University Press, 1982.
- 4 Chizari M, Al-Hassani S T S, Barrett L M. Experimental and numerical study of water jet spot welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198(1): 213-219.
- 5 Turgutlu A, Al-Hassani S T S, Akyurt M. Experimental investigation of deformation and jetting during impact spot welding[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16(5): 789-799.
- 6 Saotome Y, Iwazaki H. Superplastic backward microextrusion of microparts for microelectromechanical systems[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 119(1): 307-311.
- 7 Vollertsen F, Hu Z, Niehoff H S, *et al.*. State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 151(1-3): 70-79.
- 8 Tanaka K A, Hara M, Ozaki N, *et al.*. Multi-layered flyer accelerated by laser induced shock waves[J]. *Physics of Plasmas*, 2000, 7(2): 676-680.
- 9 Gao H, Ye C, Cheng G J. Deformation on behaviors and critical parameters in microscale laser dynamic forming[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(5): 051011.
- 10 Wang Xiao, Liu Hui, Shen Zongbao, *et al.*. Forming ability of the metal foil forming by laser-driven multi-layered flyer[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0503006.
王 霄, 刘 辉, 沈宗宝, 等. 激光驱动复合飞片加载金属箔板的成形能力[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0503006.
- 11 Liu Huixia, Zhang Qiang, Gu Chunxing, *et al.*. Experimental investigation on warm micro-forming by laser-driven flyer[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0703011.
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.
- 12 Liu H, Wang H, Shen Z, *et al.*. The research on micro-punching by laser-driven flyer[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 54-55: 18-24.
- 13 Lu Mengmeng, Liu Huixia, Shen Zongbao, *et al.*. Experiment and simulation of multihole micro-punching with complex layouts by laser-driven flyer[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0403004.
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.
- 14 Wang X, Yuan Y, Shen Z, *et al.*. Investigation of the forming pressure and formability of metal foil by laser-driven multi-layered flyer [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 58: 151-160.
- 15 Liu H, Shen Z, Wang X, *et al.*. Feasibility investigations on a novel micro-embossing using laser-driven flyer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1987-1991.
- 16 Liu Chenghai, Pei Wenbing, Yan Jun, *et al.*. Laser supported detonation waves in metal target vapor[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1990, 4(2): 123-129.

- 刘成海, 裴文兵, 颜 军, 等. 金属蒸汽中的激光维持爆振波[J]. 高压物理学报, 1990, 4(2): 123-129.
- 17 Wang X, Zheng Y, Liu H, *et al.*. Numerical study of the mechanism of explosive/impact welding using smoothed particle hydrodynamics method[J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 210-219.
- 18 Bahrani A S, Black T J, Crossland B. The mechanics of wave formation in explosive welding[C]. *Proceedings of the Royal Society of London-Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1966, 296(1445): 123-136.
- 19 Cowan G R, Bergman O R, Holtzman A H. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1971, 2(11): 3145-3157.
- 20 Robinson J L. A fluid model of impact welding[C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on High Energy Rate Fabrication*, 1975, 31(1): 587-603.
- 21 El-Sobky H, Blazynski T Z. Experimental investigation of the mechanics of explosive welding by means of a liquid analogue[C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on High Energy Rate Fabrication*, 1975: 1-21.
- 22 Lee K J, Kumai S, Arai T, *et al.*. Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy lap joint fabricated by magnetic pressure seam welding[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2007, 471(1-2): 95-101.
- 23 Wang X, Gu C, Zheng Y, *et al.*. Laser shock welding of aluminum/aluminum and aluminum/copper plates[J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 26-30.

栏目编辑: 宋梅梅