

钛合金激光点焊-胶接复合接头组织性能研究

刘 申 马轶男 陶 汪* 管伟琦

(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)

摘要 利用带有预气化脉冲的激光束,对 Ti6Al4V 钛合金进行激光点焊-胶接复合连接实验,分析了胶层分解后产生的残余碳对激光点焊-胶接复合接头内组织和性能产生的影响。研究表明,胶层分解后产生的残余碳会使钛合金的激光点焊-胶接复合接头中出现大量的 TiC,并且在焊点与胶层接触的界面处生成以 TiC 为主的界面反应区。对钛合金激光点焊-胶接复合接头内部组织产生影响的残余碳主要是在预气化脉冲过程中分解所产生的,而形成界面反应区的残余碳则主要来源于后续的胶层回流现象。TiC 的出现提高了钛合金点焊-胶接复合接头的显微硬度,但是不利于提高钛合金点焊-胶接复合接头的承载能力。

关键词 激光光学; 激光点焊-胶接; 钛合金; 残余碳; 微观组织; 力学性能

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1203004

Study on Microstructure and Properties of Titanium Laser Spot Weld-Bonded Joint

Liu Shen Ma Yi'nan Tao Wang Guan Weiqi

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

Abstract The laser beam with pre-gasification pulse is used in titanium Ti6Al4V laser spot weld bonding test. The influence of residual carbon from adhesive pyrolysis on microstructure and properties of titanium laser spot weld-bonded joint is studied. The results show that lots of TiC appear in the titanium weld-bonded joint because of residual carbon from adhesive pyrolysis, and interface reaction zone compose mainly by TiC appear in the interface between spot-welded joint and adhesive layer. The residual carbon that affects the microstructure of titanium laser spot weld-bonded joint is mainly from the pyrolysis in the pre-gasification pulse, and the residual carbon which composes interface reaction zone is from the back flow of adhesive after the joining process. The advent of TiC increase the hardness of titanium weld-bonded joint, but also has an adverse effect on the tensile-shear load of titanium weld-bonded joint.

Key words laser optics; laser spot weld bonding; titanium alloy; residual carbon; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 140.3470; 160.3900

1 引言

电阻点焊-胶接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的优点,又同时克服了单一连接方式的不足^[1]。自 20 世纪 60 年代首次应用于 AN-24 飞机上以来^[2],已广泛应用于航空航天、汽车制造等领域^[3-5]。

激光焊接具有高的能量密度,近年来受到了很大的关注^[6-8]。2004 年,美国爱迪生焊接研究所(EWI)提出了激光点焊-胶接复合(LSWB)连接技

术,并将其应用于 NASA 的小飞机运输系统(SATS)项目中^[9]。虽然激光点焊工艺有着许多的优势,但是在将其与胶接技术进行复合时,遇到了较为棘手的困难——胶粘剂的高温分解。Messler 等^[10]的研究发现,金属板间的胶粘剂在激光束的热作用下发生分解后,会对熔池产生强烈的冲击作用。Liu 等^[11-13]对铝镁合金的激光点焊-胶接复合工艺及其微观组织进行了研究,其研究结果证实了胶粘剂气化后对胶层的冲击作用,但在焊缝内部未发现

收稿日期: 2014-04-22; 收到修改稿日期: 2014-07-14

作者简介: 刘 申(1984—),男,学士,工程师,主要从事材料激光焊接工艺方面的研究。E-mail: liushentotti@126.com

* 通信联系人。E-mail: taowang81@sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

明显的残余碳影响的痕迹。而通过本实验室前期的工作发现^[14-17],胶粘剂分解后产生的残余碳对低碳钢激光点焊-胶接复合接头的微观组织有较为明显的影响。

本文主要是在以往低碳钢激光点焊-胶接复合技术研究的基础上,对钛合金的激光点焊-胶接复合接头的微观组织进行研究,并结合胶粘剂在激光点焊-胶接复合连接中的运动行为与复合接头内焊点周围的界面反应区,分析胶粘剂分解产生的残余碳对激光

点焊-胶接复合接头组织的影响规律,研究微观组织变化对于复合接头断裂机制所带来的影响。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

试验中采用的金属母材为 Ti6Al4V 钛合金,具有良好的焊接性,其化学成分见表 1。图 1 为 Ti6Al4V 钛合金的原始微观组织。

表 1 Ti6Al4V 钛合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Ti6Al4V (mass fraction, %)

Element	Al	V	Fe	C	N	H	O	Others	Ti
Content	5.5~6.8	3.5~4.5	0.3	0.1	0.05	0.01	0.2	0.5	balance

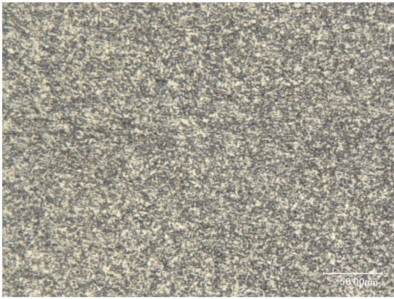


图 1 Ti6Al4V 合金的微观组织

Fig.1 Microstructure of Ti6Al4V alloy

胶粘剂采用由黑龙江省科学院石油化学研究院所提供的 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,其主要特性见表 2。

表 2 J-11 的主要特性

Table 2 Main characteristics of J-11

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

2.2 实验方法

实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,聚焦点距为 190 mm,焦斑直径为 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。脉冲激光分为两个阶段:第一阶段是预气化脉冲,作用是在保持金属上板微熔状态,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,避免胶层气体对于熔池的冲击;第二阶段是点焊脉冲,作用是在胶层气体对于熔池的冲击作用弱化后,在金属上下板间

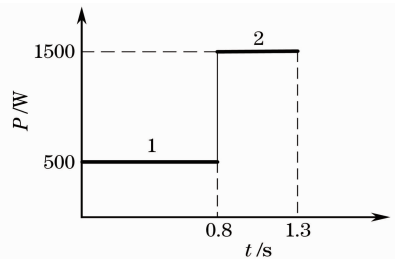


图 2 脉冲激光波形

Fig.2 Pulse waveform of pulsed laser

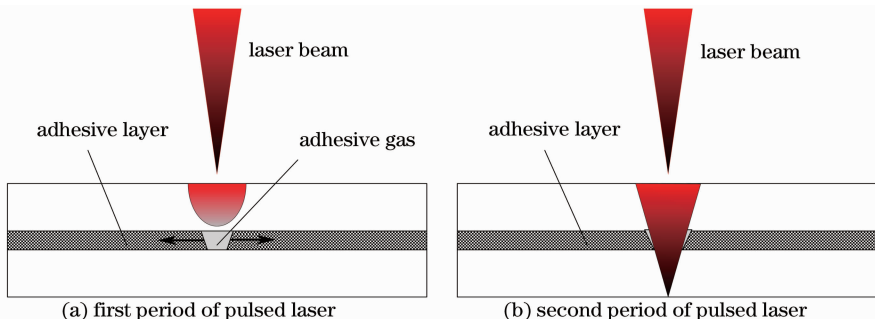


图 3 激光点焊-胶接复合过程示意图

Fig.3 Explanation of LSWB process

形成激光焊点,如图3所示。

具体的实验过程是:1)对被焊材料进行焊前的表面清理,其中,Ti6Al4V钛合金采用HF和HNO₃的混合液进行清洗;2)在清洗干净并且烘干的被焊材料搭接区域进行涂胶,在涂胶过程中一定要保证胶层厚度的均匀,以及无气泡的缺陷;3)进行激光点焊操作;4)对接头内的胶粘剂进行固化,按照不同胶粘剂自身固化条件的不同,进行有针对性的固化。

2.3 力学性能测试

采用INSTRON MODEL 5569电子万能试验机上对低碳钢和钛合金的激光点焊接头、胶接接头以及激光点焊-胶接复合接头进行拉剪性能实验。拉剪测试加载速度为3 mm/min。试件尺寸如图4所示。

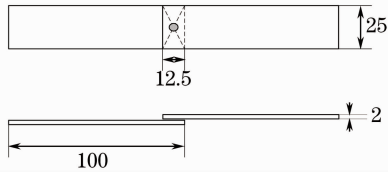


图4 拉剪试件尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Dimension of the tensile-shear test specimens (unit: mm)

2.4 微观组织与拉剪断口观察

采用Nikon金相显微镜和HITACHI S-570、S-

4700型扫描电镜(SEM)对激光点焊-胶接复合接头的微观组织形貌进行观测,用扫描电镜附件TN-5502 X-ray能谱仪(EDS)对激光点焊-胶接复合接头部分区域进行成分分析。另外,通过以上设备对力学性能测试后的断口形貌进行分析。

3 实验结果及讨论

3.1 残余碳对钛合金复合接头微观组织的影响

3.1.1 复合接头微观组织

图5所示为钛合金激光点焊-胶接复合接头中不同位置的微观组织,其中图5(a)为钛合金激光点焊-胶接复合接头的微观组织形貌,图5(b)~(f)为复合接头内不同位置的微观组织形貌。从图5(b)~(f)可以发现,在逐渐向焊点中心处靠近的过程中,马氏体组织越来越密集。在热影响区附近只有少量的 α' 片状集团和片状马氏体[图5(b)],而在焊点边缘处已有大量的马氏体组织出现,并呈现出典型的“网篮状”结构[图5(d)],在焊点中心部位则充满了针状马氏体[图5(e)]。在图5(f)中,可以很明显的发现在胶层与点焊接头接触的界面处出现了界面反应区,这一点与以往研究中所获得的低碳钢激光点焊-复合接头相类似。下面,分别对复合接头焊点内部和界面反应区的微观组织受胶层分解的影响进行分析。

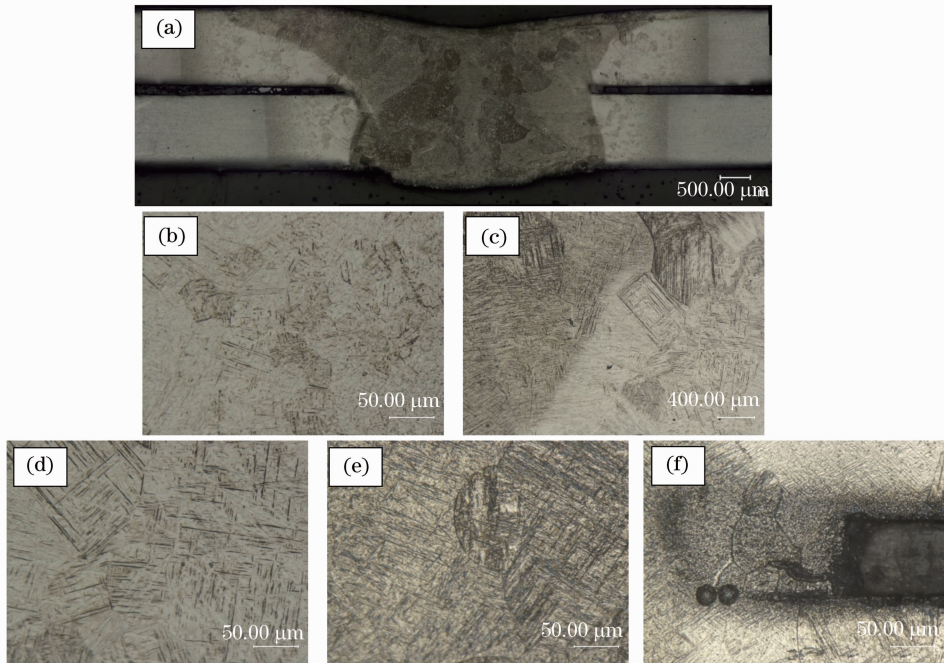


图5 钛合金激光点焊-胶接复合接头微观组织。(a)接头横截面;(b)热影响区;(c)熔合区;(d)~(e)焊点内部;(f)界面反应区


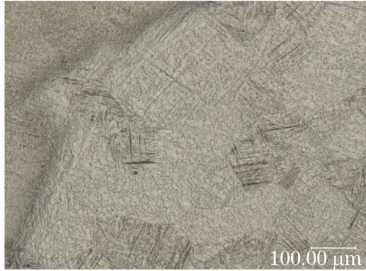
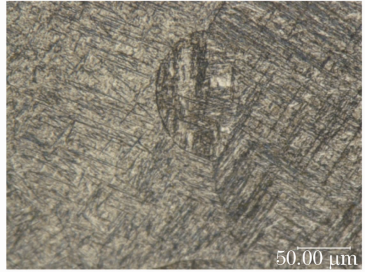
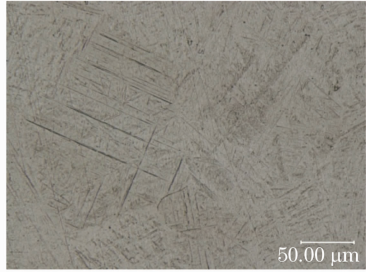
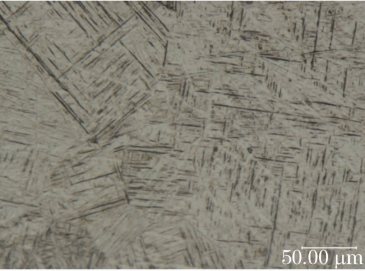
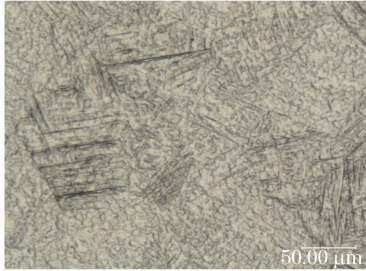
Fig. 5 Microstructure of Ti6Al4V alloy laser spot weld-bonded joint. (a) Cross-section of the joint; (b) heat affected zone; (c) fusion zone; (d)~(e) welding zone; (f) interface reaction zone

首先,对复合接头焊点内部微观组织受胶层分解的影响进行分析。表 3 为激光点焊接头与激光点焊-胶接复合接头不同位置的微观组织对比。通过表中图片的对比,可以清楚的发现,复合接头焊点区的微观组织明显发生变化,由激光点焊时的 β 柱状晶转变为等轴晶粒,产生这一现象的主要原因是胶

层分解后产生的残余碳在点焊过程中进入到熔池,而 C 元素的加入与 Ti 结合生成 TiC,抑制了 β 柱状晶的生长,使得生长出来的针状不会很长,不会贯穿晶粒,遇到晶界便停止生长,呈许多细小错乱的针状。

表 3 复合点焊与激光点焊不同区域的微观组织对比

Table 3 Comparison of the microstructure of different areas in weld-bonded joint and laser spot weld joint

Location	Weld-bonded joint	Spot welded joint
Fusion zone		
Welding zone		
Coarse grained zone		

接下来,对复合接头焊点周围界面反应区的微观组织受胶层分解的影响进行分析。对比激光点焊与激光点焊-胶接复合接头内焊点边缘处可以发现,复合接头内的焊点周围的微观组织发生明显变化,如图 6 所示,在激光点焊-胶接复合接头内焊点边缘

的界面反应区内的组织更为细化,针状 α' 更为细小。这主要是由于接近胶层区域受到胶层分解后所生产的残余碳影响,生成的碳化物进一步的抑制了晶粒的生长,使针状更为细小,并且晶界清晰可见。对界面反应区进行 X 射线(XRD)物相分析,其组分

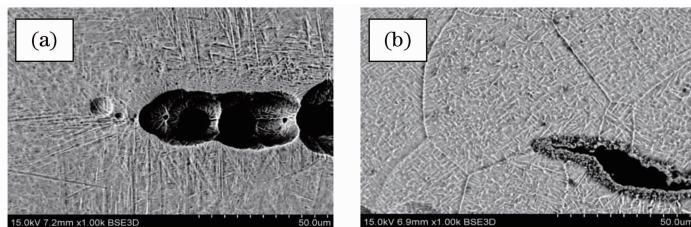


图 6 激光点焊接头与激光点焊-胶接接头界面反应区的微观组织对比。(a) 激光点焊接头;(b) 激光点焊-胶接复合接头
Fig. 6 Comparison of the microstructure between laser spot weld joint and laser spot weld-bonded joint in the interface reaction area. (a) Laser spot weld joint; (b) laser spot weld-bonded joint

主要为 TiC, 如图 7 所示, 2θ 为测试中的衍射角。

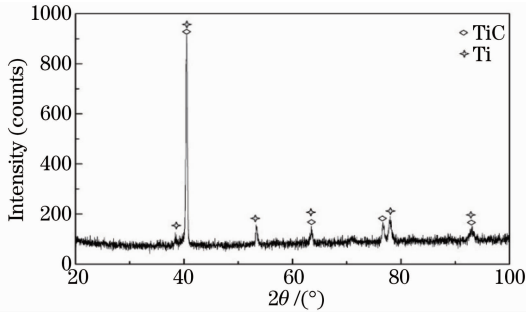


图 7 界面反应区 XRD 分析

Fig. 7 XRD analyze of reaction area

进一步对界面反应区靠近胶层部分局部进行观察, 可以发现在界面反应区靠近胶层位置存在着大

量的白色颗粒状物质。这些白色颗粒细小, 并聚集在一起, 如图 8 所示。对这两个不同区域进行能谱分析(见表 4)可以看出, 界面反应区的主要成分为 Ti、C、Al、V。而从 A 区和 B 区的 C 含量对比可以看到, 靠近胶层的界面反应区(B 区)的含碳量明显高于靠近熔池的界面反应区(A 区)。

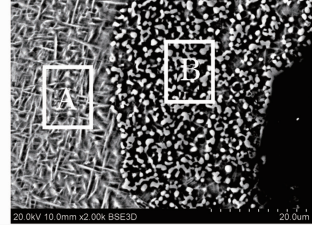


图 8 界面反应区的局部 SEM

Fig. 8 SEM of partial interface reaction area

表 4 界面反应区不同区域能谱分析

Table 4 Energy spectrum analysis of different interface reaction areas

Area	Element	Mass fraction /%	Atom fraction /%	Area	Element	Mass fraction /%	Atom fraction /%
A	CK	1.24	4.64	B	CK	11.71	34.14
	AlK	4.22	7.02		AlK	2.52	3.27
	TiK	92.42	86.49		TiK	83.77	61.22
	VK	2.11	1.86		VK	2.00	1.37

产生这一现象的主要原因是碳元素与钛元素在结晶过程中发生的相互作用。通过图 9 所示的 TiC 相图可知, TiC 的析出温度在 3067 °C, 而 β Ti 相的析出温度远远低于 TiC, 为 1648 °C, 所以在被焊接区域冷却的过程中, TiC 首先析出, 并形成白色颗粒状。当温度冷却到 β Ti 的析出温度时, 由于 TiC 为硬的质点, 并且分布在焊点内部, 从而抑制了 β 柱状晶粒的生长, 使部分柱状晶粒呈等轴状。TiC 颗粒在焊点区域流动, 由于冷却速度极快, TiC 不能均匀分布在熔池内。TiC 的疏密程度不同, 对焊点区

域的 β 柱状晶的抑制程度不同, 所以部分晶粒呈等轴状生长, 并且大小不同, 分布不均匀。

3.1.2 残余碳对复合接头微观组织的影响规律

图 10 所示为当功率为 500 W, 持续时间为 0.8 s 时的预气化脉冲结束后的复合接头横截面, 可以很清晰的看到, 在金属上板与胶层接触的界面处出现了界面反应区, 而金属下板与胶层的界面处则无任何反应。由此, 可以确认在预气化脉冲阶段, 金属板间的胶层发生了分解, 产生了残余碳, 而且会通过扩散行为进入到金属上板与胶层之间的界面处, 形成界面反应区。由于这一部分的界面反应区在后续的点焊脉冲作用时会发生熔化, 卷入到熔池中后会在液态金属的流动作用下在整个熔池内均匀分布。由此可知, 影响复合接头的焊点内部微观组织

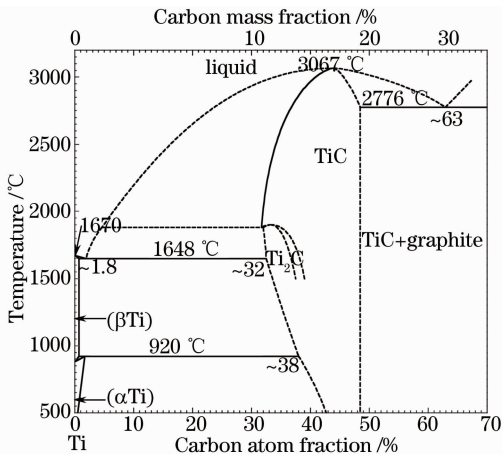


图 9 TiC 相图

Fig. 9 Phase diagram of TiC

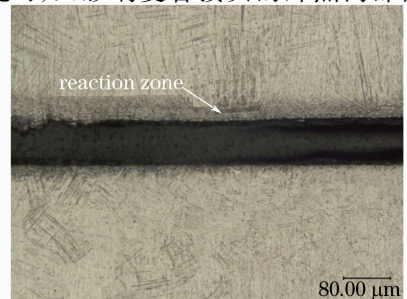


图 10 界面反应区组织的形貌

Fig. 10 Morphology of interface reaction zone

的残余碳,主要是来自于预气化脉冲阶段扩散到金属上板内的残余碳。

图 11 所示为点焊脉冲阶段后,焊点与胶层之间界面处界面反应层的形貌。可以看到金属上板与胶层之间的界面、焊点边缘处和金属下板与胶层接触的界面都出现了界面反应层,并且越靠近焊点处的界面反应层越厚。这主要是由于在后续胶层回流过程中,当胶层与仍处于高温状态的焊点及其周围金属板接触时,胶层会发生微量分解,由于此时焊点边缘已经不再处于流动状态,因此胶层分解后所形成的残余碳只能通过扩散的手段进入焊点周围,由于越靠近焊点处,其温度越高并且冷却时间越长,这就为扩散反应提供了更多的动力和更长的时间,进而获得厚度更大的界面反应层。由此可知,产生焊点周围界面反应区的残余碳来自于胶层回流过程中的轻微分解。



图 11 点焊脉冲后界面反应层组织的形貌

Fig. 11 Morphology of interface reaction zone after spot welding pulse

3.2 复合接头的力学性能

3.2.1 显微硬度

图 12 为激光点焊-胶接接头和激光点焊接头在金属上板厚度中心位置,沿着远离焊点的方向从焊点中心显微硬度变化曲线,其中细线为激光点焊-胶接接头硬度曲线,粗线为激光点焊硬度曲线。

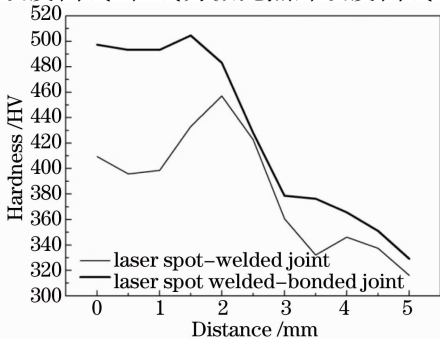


图 12 激光点焊-胶接与激光点焊的显微硬度分布

Fig. 12 Microhardness distribution of laser spot-welded joint and laser spot weld-bonded joint

在冷却阶段,钛合金发生马氏体相变会产生中等程度的硬化效果,所以两种接头的焊点区域以及热影响区的硬度要高于母材。对比两种接头,激光点焊-胶接接头的硬度要高于激光点焊接头,焊点区域较为明显。这是由于胶层受热气化分解生成的残余碳向焊点组织内渗入,从而生成 TiC,由 TiC 晶体的结构决定了其硬度高的特性,并且这种高硬度的物质分布在焊点内部,在温度冷却过程中,靠近胶层的界面反应区,其 TiC 含量更高并且排布密集,显微硬度更是高达 537.24 HV_{0.2 g/10 s}。

3.2.2 拉剪强度

图 13 所示为点焊接头、胶接接头、复合接头三种接头的拉剪强度的对比。黑色为激光点焊接头,灰色为复合接头,阴影部分为胶接接头。可见相比于其他两种接头,复合接头的拉剪强度有所上升,但是幅度基本可以忽略不计,这与在低碳钢中所得到的结果有所不同。产生这一现象的主要原因是复合接头内形成的脆性相 TiC,过多出现的脆性相降低了复合接头的拉剪载荷,降低了复合接头的承载能力。

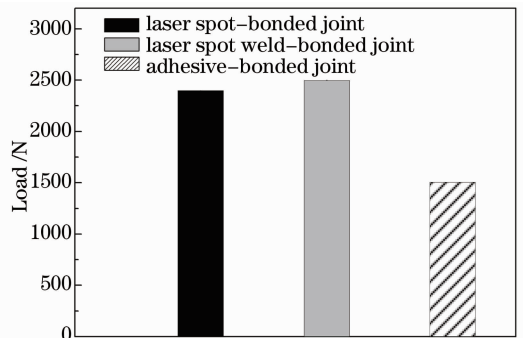


图 13 不同接头拉剪性能测试结果

Fig. 13 Results of tensile-shear test of different joints

3.2.3 复合接头的断口形貌

图 14 为激光点焊-胶接复合接头的断口形貌,其中图 14(a)为断口的宏观形貌,而 14(b)则是复合接头内焊点中心部位的断口形貌[图 14(a)中 A 区域]。从图中可以清楚地看见河流花样的解理裂纹和解理刻面。

而图 15 为激光点焊接头的断口形貌,其中图 15(a)为断口的宏观形貌,而图 15(b)则是点焊接头内焊点中心部位的断口形貌[图 15(a)中 A 区域]。通过观察发现,在激光点焊接头的断口主要为粗大柱状的组织。该处组织韧性高是由于这种结构可以使扩展裂纹沿不同取向的板条束发生偏斜,导致裂纹前沿钝化,从而吸收额外的裂纹扩展能量。

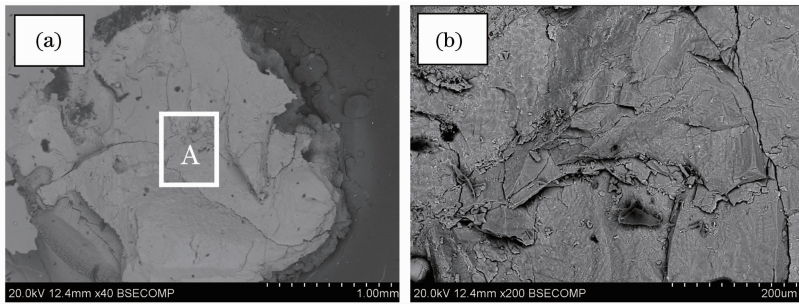


图 14 激光点焊-胶接复合接头断口形貌。(a) 宏观形貌；(b) 焊点中心部位

Fig. 14 View of the fracture morphology of laser spot weld-bonded joint. (a) Macro view; (b) middle part of the joint

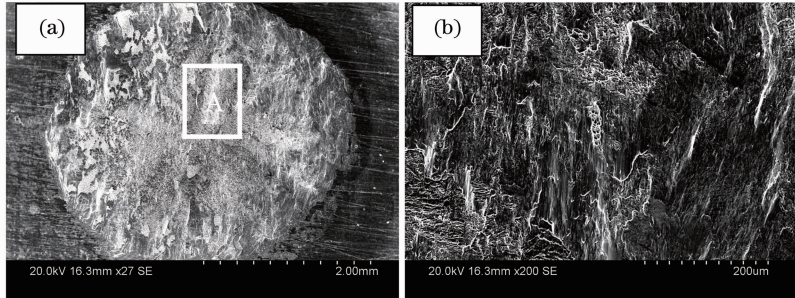


图 15 激光点焊接头断口形貌。(a) 宏观形貌；(b) 焊点中心部位

Fig. 15 View of the fracture morphology of laser spot-bonded joint. (a) Macro view; (b) middle part of the joint

产生这一现象主要是由于胶层的分解产生大量的碳渗入到接头组织内部,形成硬脆的 TiC,其在冷却过程中优先析出,从而抑制了柱状晶的生长形成等轴状,等轴状组织会加剧裂纹的扩展。碳为 α 相的稳定元素,但是马氏体的相变不会产生脆性。所以接头的脆化主要是因为碳的渗入改变了组织晶粒的生长方式,并生成了硬脆的 TiC 物质,使接头整体变脆。

4 结 论

1) 激光点焊-胶接复合工艺中,胶层在激光热的作用下裂解形成了质地疏松的残炭层,在焊接热循环的作用下,残炭层向焊点及热影响区内渗入大量的 C,使焊点、热影响区的含碳量增高,从而引起了组织的变化。激光点焊-胶接接头焊点区域部分晶粒等轴化是由于胶层受热分解产生的 C 渗入、扩散到组织内部,生成 TiC。TiC 的析出温度高于 β 相,抑制其生长使晶粒等轴化。

2) 激光点焊-胶接接头存在界面反应区,通过扫描能谱分析发现该区域的含碳量远远高于焊点以及热影响区,并且离胶层越近,TiC 颗粒越多,越密集。TiC 为硬质的小颗粒,所以在焊点处,激光点焊-胶接接头硬度高于激光点焊接头,界面反应区的显微硬度更高。

3) 对复合接头内部组织产生影响的残余碳主要是在预气化脉冲过程中分解所产生的,而形成界面反应区的残余碳则主要来源于后续的胶层回流现象。

4) 激光点焊-胶接接头强度要低于激光点焊接头但高于胶接接头。TiC 为脆性相并使接头组织发生变化,胶接面分解较多,致使承载能力下降,使接头的整体拉剪性能降低。激光点焊断口主要为韧性断裂,激光点焊-胶接断口为脆性断裂。

参 考 文 献

- 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. 单搭拉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.
- M M Schwartz. Metals Joining Manual Book[M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1979. 1-32.
- S M Darwish. Analysis of weld-bonded dissimilar materials[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004, 24(4): 347-354.
- I O Santos, W Zhang, V M Gonçalves. Weld bonding of stainless steel [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(14): 1431-1439.
- V M Gonçalves, Paulo A F Martins. Joining stainless steel parts by means of weld bonding[J]. Int J Mech Mater Des, 2006, 3(1): 91-101.
- Li Liquan, 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.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Liming Liu, Heng Wang, Gang Song, *et al.*. Microstructure characteristics and mechanical properties of laser weld bonding of magnesium alloy to aluminum alloy[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(2): 565-572.
- 12 L M Liu, H Y Wang, Z D Zhang. The analysis of laser weld bonding of Al alloy to Mg alloy[J]. Scripta Materialia, 2007, 56(6): 473-476.
- 13 L M Liu, H Y Wang. The effect of the adhesive on the microcracks in the laser welded bonding Mg to Al joint [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 507(1): 22-28.
- 14 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.
- 15 Wang Mingmao, Tao Wang, Ma Yinan, *et al.*. 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.
- 16 Wang Tao, Yanbin Chen, Yinan Ma, *et al.*. The effect of adhesive properties on laser spot weld bonding[C]. ICALEO, 2011, 1306.
- 17 Ma Yinan, Tao Wang, Chen Yanbin, *et al.*. Influence of spot arrangements on laser spot weld bonded joint fracture process[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1003002.
马轶男, 陶汪, 陈彦宾, 等. 焊点排布方式对激光点焊-胶接复合接头断裂过程的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1003002.

栏目编辑: 史敏