

激光透射焊接聚碳酸酯和聚苯醚实验研究

伍彦伟 刘会霞 李 品 蔡 野 范彩连 孟冬冬 邱唐标 王 霄

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 对异种塑料聚碳酸酯和聚苯醚激光透射焊接性能进行了研究,分析了温度属性和相容性对可焊性的影响;采用半导体激光器进行激光透射焊接实验,采用电子万能试验机测定接头拉伸剪切强度,并用响应面法对焊接工艺参数进行实验设计建模与优化;采用三维显微镜对断面形貌进行观测,分析不同扫描速度下接头失效形式。结果表明,在激光功率为6.34 W、扫描速度为40 mm/s、夹紧力为0.39 MPa时,能获得最佳的焊接强度为6.51 MPa,当能量输入密度不同时,上下层材料的熔融结合作用程度和焊接缺陷(烧蚀和气泡)是影响接头力学性能和失效形式的主要因素。利用激光透射焊接技术,可以对异种塑料实现较好的焊接效果。

关键词 激光技术; 异种塑料焊接; 激光透射焊接; 聚碳酸酯; 聚苯醚; 响应面法; 失效形式

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0503010

Experimental Study of Laser Transmission Welding between Polycarbonate and Polyphenylene Oxide

Wu Yanwei Liu Huixia Li Pin Cai Ye Fan Cailian Meng Dongdong

Qiu Tangbiao Wang Xiao

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

Abstract Laser transmission welding properties between two dissimilar polymers— polycarbonate and polyphenylene oxide are studied. The influence of temperature properties and compatibility on the weld ability are investigated. Diode laser and tensile machine are used for the welding and tensile–shear test respectively. The process parameters are designed and optimized through response surface methodology. Failure forms of weld joint under different scanning velocities are investigated by observing the fracture morphology through a 3D microscope. The results show that under the condition of 6.34 W power, 40 mm/s scanning velocity, 0.39 MPa clamp pressure, the best tensile–shear strength is 6.51 MPa. The compatibility between two melting polymers and the welding defects (ablation and voids) are the major factors that determine the mechanical properties and failure form of the joints. Dissimilar polymers are weldable by laser transmission welding.

Key words laser technique; welding of dissimilar polymers; laser transmission welding; polycarbonate; polyphenylene oxide; response surface methodology; failure forms

OCIS codes 140.2020; 350.3390; 120.7000; 140.6810

1 引 言

近年来,随着产品轻量化和节能环保需求的增加,热塑性塑料及其复合材料已开始取代金属材料在工业中得到了广泛的应用^[1-3],其中,聚碳酸酯(PC)和聚苯醚(PPO)以其优异的力学性能广泛应用于电子电器、汽车工业等行业中^[4]。激光透射焊接技术因其焊接质量好、热应力和机械应力低、容易控制、焊接效率高、可

收稿日期: 2014-10-08; 收到修改稿日期: 2015-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(51275219)、江苏省高校自然科学研究面上项目(14KJB460006)

作者简介: 伍彦伟(1989—),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: wywrunning@163.com

导师简介: 刘会霞(1964—),女,教授,博士生导师,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: lhx@ujs.cn(通信联系人)

焊接复杂零件等优点^[5-6],成为PC和PPO焊接富有应用潜力的一种焊接技术选择。目前,国内外对于激光透射焊接的研究主要集中于以下几个方面:激光透射焊接可焊性及焊接机理研究,对不同材料间的可焊性进行实验和预测^[7-8],对焊接过程中熔池的组织性能转变进行分析^[9];聚合物光学性能研究,分析聚合物光学属性(透射率、反射率和散射等)对焊接性能的影响^[10-11];焊接工艺参数研究,探索不同工艺参数下接头性能和工艺参数的优化与设计等研究^[12-15];激光透射焊接数值模拟研究,利用有限元等方法对激光透射焊接过程进行模拟仿真来指导实验^[16-18]。当前对同种塑料间的激光透射焊接研究比较深入和系统化^[19],而异种塑料焊接机理和同种塑料焊接机理有很大区别。当前对异种塑料焊接的研究较少,且缺乏系统性^[8,20]。

针对PC和PPO进行了激光透射焊接研究。首先对两种材料的温度属性和相容性进行研究,分析材料间的可焊性;然后利用响应面法对焊接工艺参数进行实验设计建模与优化,进行焊接实验,以获取最佳工艺参数;最后通过对焊接接头的拉伸剪切断面形貌进行观测,分析焊接接头焊接缺陷和失效形式,探索焊接强度的影响因素。

2 实验材料、方法及设备

2.1 实验材料

聚碳酸酯和聚苯醚都是非结晶型聚合物,属于无定型热塑性塑料。采用搭接焊形式对试样进行焊接,由于PC透射率很高,约为87%~90%^[4],故选取无色透明PC作为上层材料,选取黑色PPO为下层材料,焊接试样如图1所示。所有焊接试样在焊前都采用超声波清洗机进行清洗,然后放入干燥箱内干燥24h。

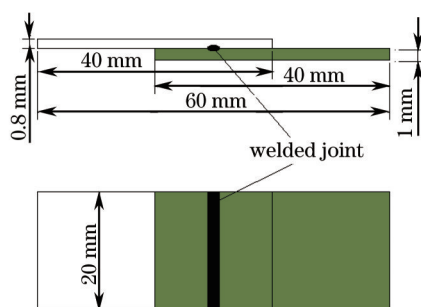


图1 焊接试样尺寸

Fig.1 Size of samples for laser transmission welding

2.2 实验方法及设备

采用差式扫描量热分析方法测量两种材料的相关温度属性;采用响应面法进行实验设计建模与优化,实验采用三因素五水平的中心复合设计,在确定的光斑直径下,考虑激光功率、扫描速度和夹紧力的变化对焊接强度的影响,通过单因素焊接实验选取的焊接工艺参数范围如表1所示。

表1 工艺参数和设计水平

Table 1 Process parameters and their limits

| Parameters | Limits | | | | |
|----------------------|--------|-------|-----|-------|-----|
| | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 |
| Laser power /W | 1 | 4.3 | 9 | 13.7 | 17 |
| Travel speed /(mm/s) | 10 | 18.11 | 30 | 41.89 | 50 |
| Clamp pressure /MPa | 0.1 | 0.26 | 0.5 | 0.74 | 0.9 |

采用Pyris Diamond TG-DTA/DSC热分析仪测量两种材料的相关温度属性(玻璃化转变温度 T_g 、熔融温度 T_m 和热分解温度 T_d)。采用Dilas公司生产的Copmact130/140型半导体连续激光器进行焊接,输出波长为 $980\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$,最大输出功率为130 W。实验采用自制的带透射窗口和压力显示的夹具。采用UTM4140型微机控制电子万能试验机进行拉伸实验,实验所用的拉伸速度为2 mm/min。采用基恩士VHX-1000型超景深三维显微镜对断口形貌进行观测。

3 结果与讨论

3.1 可焊性分析

激光透射焊接异种塑料时,塑料的温度属性,塑料间的相容性都对材料的可焊接性有很重要的影响。激光透射焊接是一种热熔融焊接,而异种塑料间的温度属性都不尽相同,较大的温度属性差距容易产生焊接缺陷和熔融不充分等现象,造成焊接强度较低导致焊接失效。异种塑料间的相容性对焊接具有决定性的影响,相容性决定了材料间是否能够充分地相互融合,产生分子链扩散和缠结作用或者形成化学键,形成牢固连接。

3.1.1 温度属性

在激光透射焊接过程中,上下层材料是在同一温度范围内进行熔融和冷却过程的,如果两种材料的温度属性相差较大,就有可能造成其中一种材料熔融而另一种材料没有熔融的现象,或者是其中一种材料熔融而另一种材料已经降解,致使上下层材料无法在同一温度范围内进行相互间的分子链扩散和缠结作用,容易产生焊接缺陷(烧蚀、气泡),使接头强度较低,焊接效果不佳。利用差式扫描量热分析仪检测PC和黑色PPO材料的玻璃化转变温度和熔点,实验采用的升温速度均为30℃/min。利用热重分析仪检测PC和黑色PPO材料的热分解温度,实验采用的升温速度均为30℃/min。得到了两种材料的玻璃化转变温度、熔融温度和热分解温度,材料的温度属性如表2所示。

表2 PC和PPO材料的温度属性
Table 2 Temperature properties of PC and black PPO

| Material | $T_g / ^\circ\text{C}$ | $T_m / ^\circ\text{C}$ | $T_d / ^\circ\text{C}$ |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| PC | 150.1 | 235.9 | 414.9 |
| PPO | 109.2 | 239.7 | 511.7 |

由实验结果可知,PC和PPO有共同的熔融温度范围239.7℃~414.9℃,两种材料能在同一温度范围内进行焊接融合作用。

3.1.2 相容性

激光透射焊接过程中,上下层材料相互熔融结合形成焊缝,在局部形成了共混。聚合物间的相容性对聚合物共混物的性能有着决定性的影响,相容性是指聚合物间的热力学相互溶解性。按照高分子材料间的热力学互容行为特征,可将两种聚合物以任意比例形成大分子水平均匀混合的均相体系,称为完全相容。如果只在一定组成范围内才形成稳定的均相体系,称为部分相容。而大部分聚合物分子间是不相容的,属于非相容体系^[21]。在激光透射焊接过程中,当两种材料相容性较好时,材料受热熔化后,上下层材料间的分子链运动加剧,实现材料界面间的分子链相互扩散并形成缠结作用,两相混合均匀稳定,材料冷却凝固后,形成牢固焊缝^[8]。当材料相容性较差时,分子链扩散及缠结作用较少,两相之间出现分离和排斥,造成焊接强度不高。而聚碳酸酯和聚苯醚是部分相容体系^[22],两相之间不能任意互融和形成分子间作用力,但能够在局部均匀混合并形成分子链的扩散及缠结作用,在焊接过程中可形成具有一定强度的焊缝,实现有效焊接。

3.2 工艺研究

采用响应面法研究了激光功率、扫描速度和夹紧力等主要工艺参数对焊接强度的交互式影响,并建立数学模型对工艺参数进行了优化。焊接强度以试样的拉伸剪切强度表征,拉伸剪切强度计算公式为

$$\sigma = \frac{F}{D \times L}, \quad (1)$$

式中 σ 为剪切强度(MPa), F 为最大拉断力(N), D 为连接接头宽度(mm), L 为试样宽度(mm)。

3.2.1 单工艺参数对拉伸剪切强度影响

图2显示了在中心点处各工艺参数对焊接强度影响的变化趋势。从图2中曲线A可以看出,随着激光功率的增加,材料的焊接强度呈现先增大后减小的趋势,这是因为当激光功率较小时,能量输入密度(激光功率同扫描速度和光斑直径之积的比值)较小^[23],材料表面吸收能量较少,焊缝区上下层材料没有发生有效的熔融冷却过程,无法形成有效焊缝,焊接强度较低。随着激光功率的增大,能量输入密度增大,材料表面吸收能量不断增大,当焊缝区域温度达到材料熔点时,上下层材料通过热传导作用开始熔融,熔池中分子链在高温下进行剧烈地无规则运动,并向相邻界面扩散且发生缠结作用,两相之间产生局部共混,当熔池冷却凝固

后,形成牢固焊接接头,焊接强度升高^[8]。当激光功率增加到一定程度时,材料表面吸收能量过大,焊缝区域温度达到材料的热分解温度,高分子材料发生热降解作用,焊缝内部出现烧蚀和气泡等焊接缺陷,焊接强度开始呈现下降趋势。

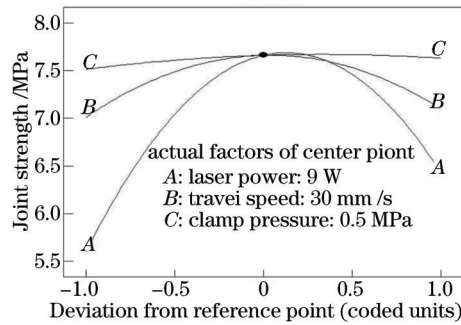


图2 工艺参数对焊接强度的影响趋势

Fig.2 Perturbation plot showing effect of all factors on lap-share strength

从图2中曲线B可以看出,随着扫描速度的增大,焊接强度呈现先增大后减小的趋势,这是因为当扫描速度较小时,能量输入密度较大,材料表面吸收能量过多,焊缝区域热降解作用剧烈,焊缝内部出现大量烧蚀和气泡等焊接缺陷,导致焊接强度较低。随着扫描速度增大,能量输入密度减小,材料表面吸收能量减少,焊接缺陷减少,焊接强度升高。当扫描速度增大到一定程度时,能量输入密度过小,材料表面吸收能量过少,焊缝区域无法进行充分的熔融冷却过程,焊缝区域分子链扩散和缠结作用减弱,焊接强度开始呈现下降趋势。

从图2中曲线C可以看出夹紧力的变化对焊接强度的影响较小。随着夹紧力增大,焊接强度整体呈现先增大后减小的趋势,这是因为在一定激光功率和扫描速度下,当夹紧力过小时,上下层材料间间隙较大,下层材料吸收的激光能量无法有效通过热传导给上层材料,上层材料不能发生充分熔融作用,无法形成有效焊缝,焊接强度较低。随着夹紧力的增加,使上下层材料间的接触更加充分,有利于上下层材料间的接触热传导,使上层材料充分熔融,形成有效焊缝,提高材料焊接强度。当夹紧力过大时,对焊接区域材料形成了过度挤压,抑制了焊缝熔融区域材料的粘性流动,使上下层材料的融合作用减弱,导致焊接强度降低。

3.2.2 工艺参数对拉伸剪切强度的交互式影响

图3显示了当夹紧力为0.5 MPa时,激光功率和扫描速度对焊接强度的交互式影响。从图3可以看出,随着扫描速度的减小和激光功率的增大,焊接强度呈现出一个先增大后减小的趋势,这是由于扫描速度的减小和激光功率的增大使材料表面能量输入密度提高,有助于焊缝的充分熔融和上下层材料间分子链扩散与缠结,进而提高强度,当能量输入密度进一步提高,热降解现象加剧,烧蚀和气泡产生,使焊接强度降低。当激光功率为9~10 W,扫描速度在28.3~35 mm/s时,焊缝材料熔融充分,上下层材料间能够进行充分地分子链扩散和缠结,焊接缺陷影响相对较小,能够获得较好的焊接强度。

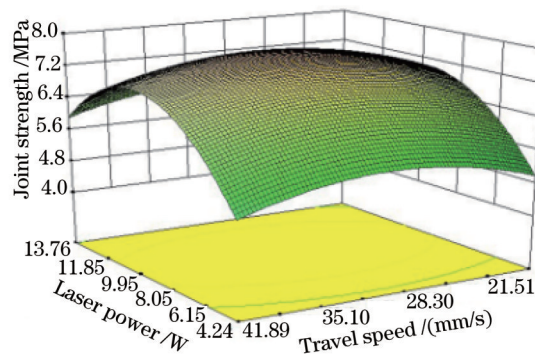


图3 夹紧力为0.5 MPa时功率与速度对焊接强度的交互式影响

Fig.3 Effect of laser power and velocity on lap-share strength under 0.5 MPa clamp pressure

图4显示了当扫描速度为30 mm/s时,激光功率和夹紧力对焊接强度的交互式影响。由图4可知,激光功率的变化比夹紧力的变化对焊接强度的影响更加显著。在一定夹紧力情况下,激光功率过大或过小,焊

接强度都较低,这是由于激光功率过大时,能量输入密度较大,焊缝温度过高产生热分解,焊缝内出现烧蚀和气泡,降低焊接强度。当功率较小时,能量输入密度较小,焊缝熔融不充分,无法形成有效焊缝,焊接强度较低。当激光功率在9~9.95 W,夹紧力在0.42~0.58 MPa时,能获得较好的焊接强度。

图5显示了当激光功率在9 W时,扫描速度和夹紧力对焊接强度的交互式影响。由图5可知,扫描速度的变化比夹紧力的变化对焊接强度的影响更加显著,在一定夹紧力情况下,扫描速度过小或过大,焊接强度都较低,这是由于扫描速度过小时,能量输入密度较大,材料焊接温度过高产生热分解,焊缝内出现烧蚀和气泡,使焊接强度降低,当扫描速度过大时,能量输入密度较小,焊缝熔融不充分,无法形成有效焊缝,焊接强度较低。当扫描速度在28.30~31.70 mm/s,夹紧力在0.58~0.74 MPa时,能够获得较好的焊接强度。

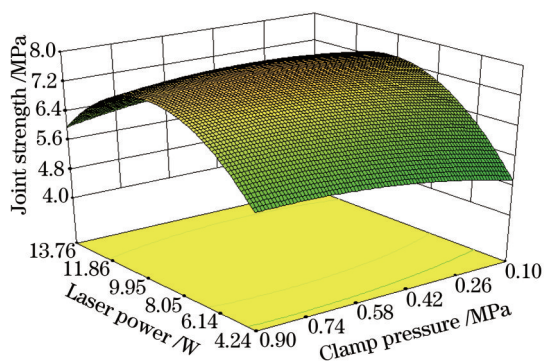


图4 扫描速度为30 mm/s时,功率与夹紧力对焊接强度的交互式影响

Fig.4 Effect of laser power and clamp pressure on lap-share strength under 30 mm/s travel speed

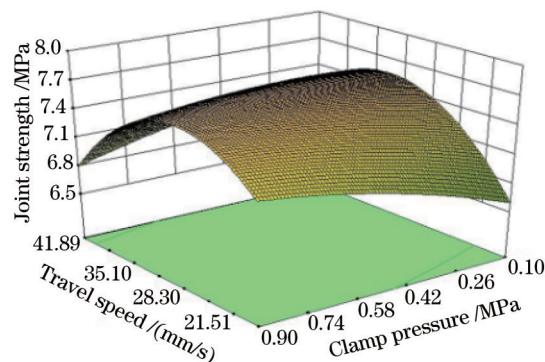


图5 激光功率为9 W时,夹紧力与扫描速度对焊接强度的交互式影响

Fig.5 Effect of clamp pressure and velocity on lap-share strength under 9 W laser power

3.2.3 工艺参数优化

采用Design-Expert V8.5软件对实验数据进行处理与分析,计算拟合了工艺参数与焊接强度之间的二阶多项式模型,其表达式为

$$\sigma = 7.66 + 0.42A + 0.043B + 0.058C + 0.048AB + 0.17AC + 0.26BC - 1.64A^2 - 0.6B^2 - 0.08C^2, \quad (2)$$

式中A表示激光功率(W),B表示扫描速度(mm/s),C表示夹紧力(MPa)。基于此二阶多项式模型,可以通过响应曲面(RSM)方法对焊接工艺参数进行优化,改善焊接质量。在实际应用中,激光功率越大,能源消耗越大,焊接成本增加,而较高的扫描速度能显著提高生产效率,综合考虑焊接成本、生产效率和焊接质量,选用的优化准则为:最小的激光功率、最高的扫描速度和最大的焊接强度,根据该优化准则获得的最佳工艺参数为激光功率6.34 W、扫描速度40 mm/s、夹紧力0.39 MPa,所能达到的焊接强度为6.51 MPa。

3.3 拉伸剪切失效分析

选取实验获得的最佳工艺参数激光功率6.34 W,夹紧力0.39 MPa,变换扫描速度为10、40、50 mm/s制作焊接拉伸试样。

图6表明,当扫描速度为10 mm/s时,在拉伸剪切力的作用下,焊缝断裂后断口边缘产生大量气泡,气泡周围产生明显的沿拉伸方向的延性撕裂现象,如图6(b)所示;在断口中心区域,有一段长为300 μ m的阶梯状撕裂纹,如图6(c)所示;而断口中间有明显的烧蚀沟槽,为韧性和脆性的混合型断口。这是由于在能量输入密度较大时,焊缝中间产生了烧蚀和热分解,使材料脆化,发生脆性断裂现象;热解和材料中水分蒸发产生的气体向焊缝边缘扩散形成气泡,在焊缝边缘区域,能量输入较少,热解作用较弱,上下层分子链扩散和缠结作用较强,产生明显的延性断裂现象。断裂从焊缝边缘开始产生,气泡、烧蚀等焊接缺陷诱导的应力集中和焊缝内部分层所造成的不平衡应力场诱导了裂纹的扩展,使焊缝最终断裂。结果表明,能量输入密度较大,焊缝内部受热不均匀,使焊缝内部出现了中心阶梯状撕裂区域和两边的局部延性撕裂区域,为韧性和脆性的混合型断口,焊接较低,约为4.88 MPa。

图7表明,当扫描速度为40 mm/s时,在拉伸剪切力的作用下,焊缝断裂后断口中间产生大量气泡,气泡周围产生明显的沿拉伸方向的延性撕裂现象,如图7(b)所示,为韧性断裂。这是因为,此时能量输入密度仍

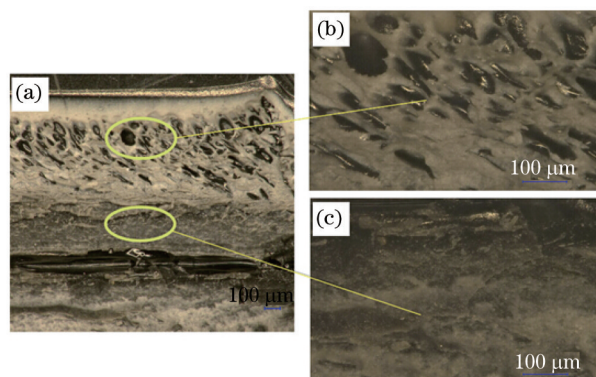


图6 扫描速度为10 mm/s时的断口形貌。(a)放大150倍; (b)放大500倍; (c)放大500倍

Fig.6 Photos of fracture under 10 mm/s scanning velocity.(a) Magnified 150 times; (b) magnified 500 times; (c) magnified 500 times
 然较高,材料部分热解和材料中水分蒸发产生了气泡,焊缝材料充分熔融,上下层材料分子链扩散和缠结作用剧烈,导致焊缝出现延性断裂。结果表明,焊缝虽然产生部分热解现象,但是相对较高的能量输入密度使上下层充分的熔融结合,分子链作用剧烈,使焊接强度较高,约为6.51 MPa。

如图8示,当扫描速度为50 mm/s时,在拉伸剪切力作用下,焊缝断裂后断口平坦,出现人字形断面形貌,为脆性断裂。这是因为,此时能量输入密度较小,上下层材料熔融不充分,上下层分子链扩散和缠结作用较弱,结合力较小,使裂纹快速扩展导致脆性断裂。结果表明,能量输入密度较小,使焊缝较浅,断口表面平坦,出现人字形断口形貌,为脆性断裂,焊接强度较低,约为5.35 MPa。

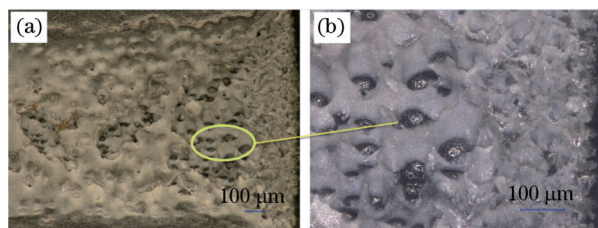


图7 扫描速度为40 mm/s时的断口形貌。(a)放大200倍; (b)放大500倍

Fig.7 Photos of fracture under 40 mm/s scanning velocity. (a) Magnified 200 times; (b) magnified 500 times

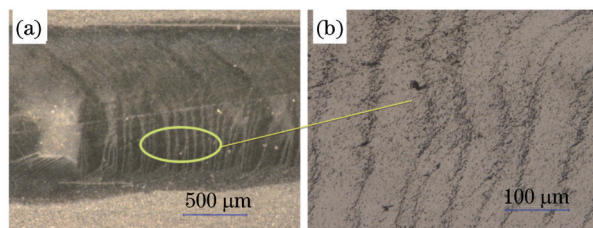


图8 扫描速度为50 mm/s时的断口形貌。(a)放大150倍; (b)放大700倍

Fig.8 Photos of fracture under 50 mm/s scanning velocity. (a) Magnified 150 times; (b) magnified 700 times

4 结 论

1) 通过对透明PC和黑色PPO材料的温度属性和相容性分析,发现PC和PPO具有共同的熔融温度范围为239.7℃~414.9℃,为部分相容体系,两种材料具有较好的可焊性。

2) 应用响应曲面法对工艺参数进行建模与优化,以最小的激光功率、最高的扫描速度和最高焊接强度为优化准则,所获得的最优工艺参数为:激光功率6.34 W、扫描速度40 mm/s、夹紧力0.39 MPa,所能获得的焊接强度为6.51 MPa。

3) 在最优工艺参数下,虽然材料内部出现气泡,不过由于能量输入密度较大,焊缝能够进行充分熔融结合,分子链交互作用剧烈,焊接强度高。而能量输入密度过大或过小时,焊缝出现烧蚀和气泡或者熔融不充分,导致焊接强度较低。

4) 在最优工艺参数下,焊缝失效形式为韧性断裂,当能量输入密度过大时,失效形式为脆性和韧性的混合断裂,当能量输入密度较小时,失效形式为脆性断裂。

参 考 文 献

1 N Amanat, C Chaminade, J Grace, *et al.*. Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether-ether-ketone for applications in the medical device industry[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(10): 4823-4830.

- 2 Zhu Zegang. Introduction and market application of engineering plastics in automotive[J]. Rubber & Plastics Resources Utilization, 2010, 1: 006.
朱则刚. 谈车用工程塑料及其市场追踪[J]. 橡塑资源利用, 2010, 1: 006.
- 3 C Tsao, D L Devoe. Bonding of thermoplastic polymer microfluidics[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2009, 6(1): 1-16
- 4 Huang Li. Macromolecular Material[M]. Bei Jing: Chemical Industry Press, 2005: 107-110, 114-116.
黄 丽. 高分子材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 107-110, 114-116.
- 5 X Wang, P Li, Z Xu, *et al.*. Laser transmission joint between PET and titanium for biomedical application[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(13): 1767-1771.
- 6 Pang Zhenhua, Yang Shaokui, Song Jie, *et al.*. Technology and typical application of laser welding of plastics[J]. Mechanical Electrical Engineering Technology, 2010, 39(4): 17-19.
庞振华, 杨绍奎, 宋 杰, 等. 激光塑料焊接技术及其典型应用[J]. 机电工程技术, 2010, 39(4): 17-19.
- 7 T B Juhl, D Bach, G Larson, *et al.*. Predicting the laser weld ability of dissimilar polymers[J]. Polymer, 2013, 54(15): 3891-3897.
- 8 T B Juhl, E A Jensen. Investigation on high strength laser welds of polypropylene and high-density polyethylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 129(5): 2679-2685.
- 9 E Ghorbel, C Giuseppe, S Abed. Laser diode transmission welding of polypropylene geometrical and microstructure characterisation of weld[J]. Materials and Design, 2009(30): 2745-2751.
- 10 M Chen, G Zak, P J Bates. Description of transmitted energy during laser transmission welding of polymers[J]. Welding in the World, 2013, 57(2): 171-178.
- 11 M Chen, G Zak, P J Bates. Effect of carbon black on light transmission in laser welding of thermoplastics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(1): 43-47.
- 12 X Wang, X Song, M Jiang, *et al.*. Modeling and optimization of laser transmission joining process between PET and 316L stainless steel using response surface methodology[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(3): 656-663.
- 13 B Acherjee, S Mondal, B Tudu, *et al.*. Application of artificial neural network for predicting weld quality in laser transmission welding of thermoplastics[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2): 2548-2555.
- 14 B Acherjee, A S Kuar, S Mitra, *et al.*. Experimental investigation on laser transmission welding of PMMA to ABS via response surface modeling[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(5): 1372-1383.
- 15 Xue Guochun, Liu Huixia, Li Pin, *et al.*. Process study on laser transmission bonding of silicon with glass via response surface methodology[J]. Chinese J lasers, 2013, 40(3): 0303004.
薛国春, 刘会霞, 李 品, 等. 基于响应曲面法的激光透射连接硅与玻璃的工艺研究[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303004.
- 16 M Devrient, X Da, T Frick, *et al.*. Experimental and simulative investigation of laser transmission welding under consideration of scattering[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 117-127.
- 17 X Wang, N Chen, H Liu, *et al.*. Simulation and optimization of continuous laser transmission welding between PET and titanium through FEM, RSM, GA and experiments[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(11): 1245-1254.
- 18 Chen Hao, Wang Xiao, Liu Huixia, *et al.*. Numerical simulation-driven optimization of laser transmission welding process between PET and 304L stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403006.
陈 浩, 王 霄, 刘会霞, 等. 数值模拟驱动的激光透射焊接 PET 与 304L 不锈钢的优化研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403006.
- 19 Zhang Wei, Zhang Qingmao, Guo Liang, *et al.*. Research on the properties of through-transmission laser welding of polycarbonate [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0703001.
张 卫, 张庆茂, 郭 亮, 等. 激光透射焊接聚碳酸酯接头性能研究[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0703001.
- 20 Wang Jianchao, Qin Liming, Li Jiao. Technics and microcosmic analysis research of PMMA/ABS thermoplastic laser transmission welding[J]. Applied Laser, 2008, 28(4): 287-291.
王健超, 秦丽明, 李 姣. PMMA/ABS 热塑性塑料激光透射焊接工艺研究及微观分析[J]. 应用激光, 2008, 28(4): 287-291.
- 21 Luo Hesheng. Plastics Modification and Application Technology[M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 2007: 17-21.
罗河胜. 塑料改性与实用工艺[M]. 广州: 广东科技出版社, 2007: 17-21.
- 22 Shen Yu. A Study on PPO/PA6 Alloy with Excellent Properties[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 2-3.
申 瑜. 高性能聚苯醚/尼龙 6 共混合金的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 2-3.
- 23 U A Russek, A Palmen, H Staub, *et al.*. Laser beam welding of thermoplastics[J]. SPIE, 2003, 4977: 458-472.

栏目编辑: 宋梅梅