

文章编号: 0258-7025(2010)07-1914-07

医用 PET 薄膜与薄钛板激光透射连接工艺研究

李 品 刘会霞 许贞凯 宋新华 王 霄

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 激光透射连接工艺在生物医学植入体及其封装中具有良好的应用前景。使用半导体连续激光器进行了 0.1 mm 厚医用聚对苯二甲酸乙二酯(PET)薄膜与 0.1 mm 厚薄钛板之间的激光透射连接实验,分别采用单工艺参数和双工艺参数进行全面实验对连接接头质量进行分析,并使用光学显微镜对不同工艺参数情况下的接头形貌进行观测。在实验基础上,通过单工艺参数分析得到了 PET 薄膜与薄钛板激光透射连接的工艺参数,这可为激光透射连接时提供合理的工艺参数范围;通过双工艺参数分析得到了主要工艺参数对连接接头质量的影响,这可为激光透射连接时选取适当的工艺参数以提高加工效率。

关键词 激光技术;激光透射连接;生物医学植入体;激光工艺参数;连接质量

中图分类号 TG456. 7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1914

Laser Transmission Joining Process of PET Films and Titanium

Li Pin Liu Huixia Xu Zhenkai Song Xinhua Wang Xiao

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

Abstract Laser transmission joining of dissimilar and biocompatible materials has potential application in biomedical implants and their encapsulation process. 0.1 mm thick PET films and 0.1 mm thick titanium are joint using laser transmission joining technology. The effects of main laser parameters including laser power, scanning speed on joint quality are investigated by using analysis of variance. The results show that laser transmission joining can be used to join PET films and titanium. Based on the research, laser transmission joining of PET film and titanium process window is obtained; it will be helpful for the premise of guarantee of joint quality.

Key words laser technique; laser transmission joining; biomedical implant; laser parameters; joint quality

1 引 言

生物医学植入体是指借助外科手术全部或者部分进入人体或自然腔道中,在手术结束后长期留在体内,用以修复与替换人体组织或器官恢复生理系统功能障碍的器械^[1],包括心脏起搏器、耳蜗植入体、骨科矫形器和人工肺等。由于部分植入体中存在生物有毒性物质如硅、电极等,因此需要使用具有抗生物降解能力的材料进行连接(或封装)以适应人体内复杂的环境^[2,3]。具有抗生物降解能力的材料主要有金属(如钛及钛合金、不锈钢、金、银、镍等)^[4]、玻璃^[5]、陶瓷^[6]和聚合物^[7]等。因此研究具

有抗生物降解能力材料的同种或异种连接(或封装)工艺在医用领域具有良好的应用前景。对于异种材料的连接,如金属与玻璃、金属与聚合物之间的连接,常用的方法包括有胶粘、钎焊和超声波焊接等,但这些方法并不适合生物医疗领域。胶粘加工完成后,由于收缩将造成温度应力,并且绝大部分胶粘剂不具有生物相容性。钎焊加工的连接强度、质量以及很高的热输入限制了它在生物医学植入体封装中的应用^[8]。超声波焊接通过对热塑性材料沿着连接处施加振动从而焊接起来。但是不能用来连接金属与塑料或塑料与合成纤维等^[9]。激光透射连接工艺

收稿日期: 2009-10-23; 收到修改稿日期: 2009-11-02

作者简介: 李 品(1983—),男,硕士研究生,主要从事激光加工和逆向工程等方面的研究。

E-mail: lipin_0517@163.com

导师简介: 刘会霞(1964—),女,博士,教授,主要从事激光加工和表面微细造型数值模拟和实验、数字化设计与制造技术等方面的研究。E-mail: lhx@ujs.edu.cn

则可以克服上述工艺的缺陷。近年来,美国 Fraunhofer 激光技术中心 (CLT)、德国亚琛 Fraunhofer 激光技术学会 (ILT)、美国底特律韦恩大学 Golam Newaz 研究小组、美国蒙大纳大学 Ahsan Mian 研究小组采用这一连接工艺成功地进行了聚酰亚胺与钛^[10],聚酰亚胺与具有钛涂层的玻璃^[11],聚偏氟乙烯与钛^[12],KaptonFN 与钛^[13]以及 TeflonFEP 与钛^[14]之间的连接。此外,由于激光能够聚焦到很小的光斑,使得在加工后的工件上可获得很窄的热影响区。

本文使用半导体连续激光器进行了 0.1 mm 厚医用聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 薄膜与 0.1 mm 厚薄钛板之间的激光透射连接实验,研究了激光功率、加工速度等主要工艺参数对连接接头尺寸和接头强度的影响,并使用光学显微镜对不同工艺参数情况下的接头形貌进行观测。

2 实验方案和激光透射连接条件

2.1 实验准备与实验设备

实验使用 0.1 mm 厚医用聚对苯二甲酸乙二酯薄膜和 0.1 mm 厚薄钛板,试样尺寸均为 30 mm × 10 mm × 0.1 mm。连接前使用型号为 W28 金相砂纸对钛表面打磨,接着用超声波清洗机清洗,最后用丙酮轻微擦拭并迅速用热风烘干,以除去钛金属表面的油污及低分子析出物。

激光器采用 Dilas 公司 Copmact130/140 型半导体连续激光器,最大输出功率为 130 W,输出波长为 980 ± 10 nm,最小光斑直径为 700 μm。激光器冷却系统采用内置的风冷系统,工作温度为 15 ~ 35 °C。三轴联动工作台采用大理石基座,台面行程为 300 mm × 300 mm × 200 mm,重复定位精度为 0.01 mm,速度为 0 ~ 3000 mm/min。采用全程光纤传输模式,光纤的芯径 $D = 400 \mu\text{m}$,数值孔径 NA 为 0.22。

2.2 实验方法

实验采用顺序周线型搭接方式。影响连接接头质量的主要工艺参数包括:激光器功率、加工速度、离焦量、夹具加紧压力等。采用 K9 玻璃作为夹持层,夹具加紧压力选取 1 MPa,离焦量为 +2 mm。采用双因素全面实验方法,并采用固定效应模型方差分析与 Duncan 多重比较法对连接接头质量进行分析^[15]。

对连接接头质量评价方法主要有:连接接头强度;接头宽度;美观度等。以最主要的评价方法接头

强度与接头宽度来评价连接接头质量。使用 CMT5205 微机控制电子万能试验机进行拉伸实验,使用上海光学仪器厂生产的 XTZ-FG 型体视显微镜进行接头形貌的观测。

2.3 激光透射连接条件

激光透射连接的先决条件是两个被连接件,一个能够透过激光而另一个吸收激光能量^[16~18]。图 1 为激光透射连接基本原理示意图。连接的可行性取决于待连接零件材料的光学属性。使用的 PET 薄膜在半导体激光波长 980 ± 10 nm 范围内具有极高的透射率,而薄钛板则具有较低的热传导性和较高的激光吸收率。

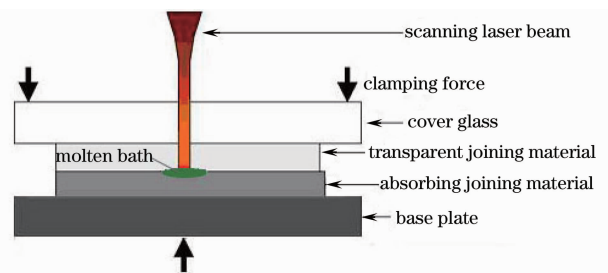


图 1 激光透射连接基本原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser transmission joining

3 实验结果与分析

3.1 接头形貌

激光器功率为 5 W,加工速度为 100 mm/min 时,所得的样品宏观图片如图 2 所示。从宏观图片中可以看出,样品成形美观,表面无破损,连接接头均匀平滑,无明显缺陷,实现了 PET 薄膜与薄钛板之间的激光透射连接。



图 2 样品宏观图片

Fig. 2 Joint sample

图 3 为加工速度为 50 mm/min,激光器功率 P 分别为 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6 W 时连接接头的典型形貌。从图 3 可以看出随着激光器功率的增加,被连接件吸收的热量不断增加,连接接头宽度不断变宽。当激光器功率为 3.5 和 4 W 时,连接接头未能充分作用,接头周围未出现明显的热影响区;当激光器功率为 4.5 和 5 W 时,连接效果最佳,接头成形

良好,未出现明显缺陷,形成了完整的热影响区;当激光器功率为 5.5 和 6 W 时,连接接头出现部分分解和烧蚀,在功率为 6 W 时,因热输入量过大,实验

样品已与夹持的 K9 玻璃发生了作用而连接在一起,分离出实验样品后,实验样品表面已出现了破坏。

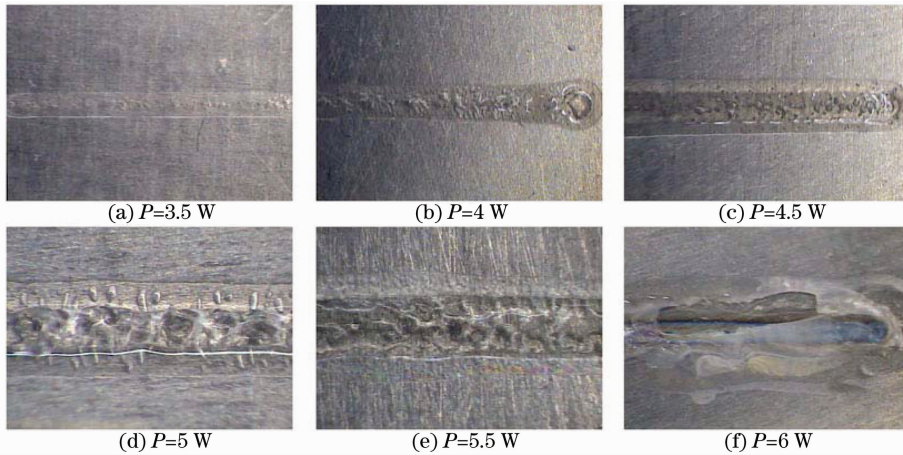


图 3 连接接头的典型形貌

Fig. 3 Representative joint morphologies

3.2 单工艺参数对连接接头质量的影响

3.2.1 激光器功率对连接接头质量的影响

在不同的加工速度下,选取 4~5.5 W 之间的 4 组参数进行连接实验。连接接头宽度和接头强度与激光器功率的关系如图 4 和 5 所示。

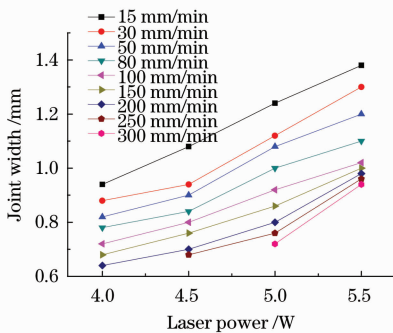


图 4 激光器功率对接头宽度的影响

Fig. 4 Change curve of Joint width at different laser powers

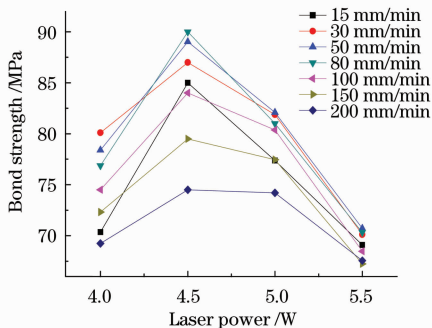


图 5 激光器功率对连接接头强度的影响

Fig. 5 Change curve of bond strength at different laser powers

从图 4 可以看出,在相同的加工速度下,连接接头宽度随着激光器功率的增大而变宽。在加工速度为 15 mm/min 时,连接接头宽度由最小值 0.94 mm 上升到最大值 1.38 mm。这是因为随着激光器功率的增大,在相同的加工速度下,同一时间内激光器的热输入量增大,导致连接接头不断变宽。

从图 5 可以看出,在相同的加工速度下,连接接头强度在激光功率为 4~4.5 W 时呈上升趋势;而在激光功率为 4.5~5.5 W 时连接接头强度呈下降趋势。如在加工速度为 80 mm/min,功率为 4~4.5 W 时,连接接头强度从 76.87 MPa 上升到 90 MPa,而在激光功率为 4.5~5.5 W 时,连接接头强度从 90 MPa 下降到 70.31 MPa。这是因为当功率较小时,激光器的热输入量较小,PET 薄膜与薄钛板之间未能充分作用,随着功率的不断增大,连接接头最终形成,达到了连接接头强度的最大值;而当功率较大时,PET 薄膜发生了部分分解和烧蚀,导致连接接头强度呈现不断下降的趋势。

3.2.2 加工速度对连接接头质量的影响

在激光器功率为 4, 4.5, 5, 5.5 W 时,选取加工速度 0~400 mm/min 之间的 9 组参数进行连接实验。连接接头宽度和接头强度与加工速度的关系如图 6 和 7 所示。

从图 6 可以看出,在相同的激光功率下,连接接头宽度随着加工速度的不断增大而变窄,在加工速度为 100 mm/min 之后,连接接头宽度变窄的趋势慢慢变缓。如在激光功率为 5 W 时,连接接头宽度从 1.24 mm 下降到 0.72 mm。因为在一定的激光

功率下,随着加工速度的增加,同一时间内激光器的热输入量不断减少,导致连接接头不断变窄。

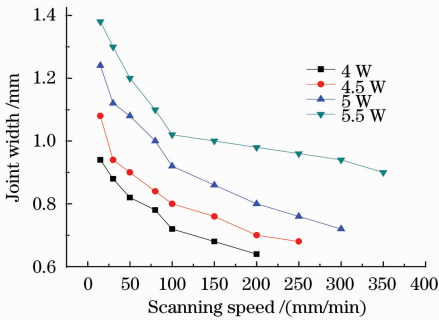


图 6 加工速度对接头宽度的影响
Fig. 6 Change curve of joint width at different scanning speeds

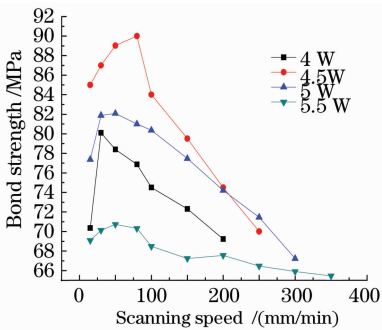


图 7 加工速度对连接接头强度的影响
Fig. 7 Change curve of bond strength at different scanning speeds

从图 7 可以看出,在相同的激光功率下,连接接头强度都随着加工速度的不断增大而出现先变大后变小的趋势。如在功率为 5 W 时,连接接头强度在加工速度 15~50 mm/min 之间时,连接接头强度从 77.37 MPa 上升到 82.09 MPa,而加工速度在 50~300 mm/min 时,连接接头强度从 82.09 MPa 下降到 67.24 MPa。因为在激光功率一定的情况下,当加工速度较小时,在相同的时间内,激光器的热输入量很大,PET 薄膜发生了部分分解和烧蚀,导致连接接头强度较低,随着加工速度的增加,同一时间内激光器的热输入量不断减少,PET 薄膜发生部分分解和烧蚀

表 1 连接接头宽度试验结果

Table 1 Results of joint width

		Factor B							$\bar{y}_{.j}$
		15	30	50	80	100	150	200	
Factor A	4	0.94	0.88	0.82	0.78	0.72	0.68	0.64	0.78
	4.5	1.08	0.94	0.9	0.84	0.8	0.76	0.7	0.86
	5	1.24	1.12	1.08	1	0.92	0.86	0.8	0.9971
	5.5	1.38	1.3	1.2	1.1	1.02	1	0.98	1.114
$\bar{y}_{.j}$		1.16	1.06	1	0.92	0.865	0.825	0.78	

的情况逐渐改善,连接接头最终形成,达到了连接接头强度的最大值;而当加工速度继续增大时,在相同的时间内,激光器的热输入量持续减少,PET 薄膜与薄钛板之间无法充分作用,导致连接接头强度呈现不断下降的趋势。并且从图 7 还可以看出当功率为 5.5 W 时,随着加工速度的变化,连接接头强度在 65.46 到 70.72 MPa 之间一个很小的范围内变化。这是因为,当激光功率为 5.5 W,速度为 0~400 mm/min 时,激光器的热输入量都较大,PET 薄膜发生了部分分解和烧蚀,导致连接接头强度较低。

通过对实验样品外观的观测以及对接头强度的测量,得到了医用 PET 薄膜与薄钛板之间激光透射连接实验的工艺参数窗口,如图 8 所示。

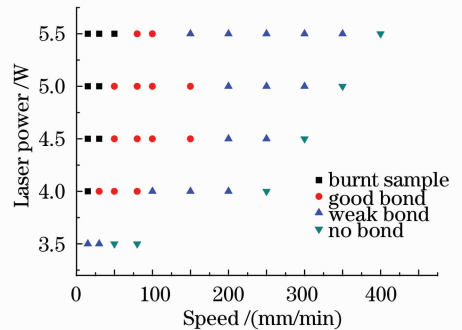


图 8 连接工艺参数窗口

Fig. 8 Parameter window for laser transmission joining

3.3 双工艺参数对连接接头质量的影响

单工艺参数分析可获得一个合理的工艺参数范围。而双工艺参数分析可获得某个工艺参数的不同水平对连接质量的影响。采用双因素固定效应模型的方差分析以及 Duncan 多重比较法对接头质量进行分析。

3.3.1 工艺参数对连接接头宽度的影响

实验有两个主要的因素:A 因素为激光器功率;B 因素为加工速度。其中 A 因素分 4 个水平(1~4):4,4.5,5,5.5 W;B 因素分 7 个水平(1~7):15,30,50,80,100,150,200 mm/min。连接接头宽度的实验结果如表 1 所示。其中 $\bar{y}_{.i}$ 和 $\bar{y}_{.j}$ 分别为 A 因素和 B 因素各水平的平均值。

根据表 1 所示接头宽度实验结果计算相应因素的平方和、自由度、均方差和 F 值,并进行方差分析,结果如表 2 所示。

表 2 接头宽度方差分析表

Table 2 Analysis of variance of joint width

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F
Factor A	0.526	3	0.175	175
Factor B	0.444	6	0.074	74
Error	0.016	18	0.001	
Total	0.986	27		

查表得 $F_{0.01}(3,18) = 5.1 < 175, F_{0.01}(6,18) = 4.0 < 74$ 。当显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时,因素 A 与因素 B 的各水平对连接接头宽度的影响均有显著差异。

用 Duncan 多重比较法对于显著因素的各水平间进行比较。比较因素 A 的各水平平均值,这些均值的均方估计值为 $S_{\bar{y}_i} = \sqrt{\frac{S}{b}} = \sqrt{\frac{0.001}{7}} = 0.01195$, 式中 S 为均方差误差值,误差自由度为 $f = 6$,各水平的均值依从小到大的次序排列如下: $\bar{y}_1 = 0.78, \bar{y}_2 = 0.86, \bar{y}_3 = 0.9971, \bar{y}_4 = 1.114$ 。表 3 为因素 A 诸水平平均值比较结果。

表 3 因素 A 诸水平平均值比较结果

Table 3 Comparison results of mean at different levels of factor A

Level	1	2	3
4	0.334	0.254	0.1169
3	0.2171	0.1371	
2	0.08		

由 Duncan 显著极性表查得 $r_{0.05}(2,18) = 2.97, r_{0.05}(3,18) = 3.12, r_{0.05}(4,18) = 3.21$, 计算显性极差值: $R_2 = r_{0.05}(2,18)S_{\bar{y}_i} = 0.035492$,

表 5 连接接头强度实验结果

Table 5 Results of bond strength

	Factor B								\bar{y}_i
	15	30	50	80	100	150	200		
Factor A	4	70.36	80.1	78.4	76.9	74.5	72.319	69.24	74.54
	4.5	85	87	89.03	90	84	79.5	74.5	84.15
	5	77.37	81.88	82.09	81	80.37	77.46	74.2	79.20
	5.5	69.09	70.12	70.72	70.31	68.47	67.24	67.56	69.07
	$\bar{y}_{.j}$	75.45	79.77	80.06	79.55	76.84	74.13	71.38	

$R_3 = 0.037284, R_4 = 0.03836$ 。由表 3 可以看出因素 A 的任意两个水平之间的比较值均大于显性极差值,因此任意两个水平之间都是有显著差异的。

比较因素 B 的各水平均值,这些均值的均方误差

估计值为 $S_{\bar{y}_{.j}} = \sqrt{\frac{S}{a}} = \sqrt{\frac{0.001}{4}} = 0.01581$,从大到小次序排列如下: $\bar{y}_{.1} = 1.16, \bar{y}_{.2} = 1.06, \bar{y}_{.3} = 1, \bar{y}_{.4} = 0.92, \bar{y}_{.5} = 0.865, \bar{y}_{.6} = 0.825, \bar{y}_{.7} = 0.78$ 。表 4 为因素 B 诸水平平均值比较结果

由 Duncan 显著极性表查得: $r_{0.05}(5,18) = 3.27, r_{0.05}(6,18) = 3.32, r_{0.05}(7,18) = 3.35$, 计算显性极差值: $R_2 = r_{0.05}(2,18)S_{\bar{y}_{.j}} = 0.046956, R_3 = 0.049327, R_4 = 0.05075, R_5 = 0.051699, R_6 = 0.052489, R_7 = 0.052964$ 。

由表 4 可以看出速度为 100 与 150 mm/min 之间,150 与 200 mm/min 之间对连接接头宽度无显著差异。因此在相近的连接接头宽度的要求下,可以通过选择较高的加工速度进行加工,以提高加工效率。

表 4 因素 B 诸水平平均值比较结果

Table 4 Comparison results of mean at different levels of factor B

Level	7	6	5	4	3	2
1	0.38	0.335	0.295	0.24	0.16	0.1
2	0.28	0.235	0.195	0.14	0.06	
3	0.22	0.175	0.135	0.08		
4	0.14	0.095	0.055			
5	0.085	0.04				
6	0.045					

3.3.2 工艺参数对连接接头强度的影响 连接接头强度实验结果如表 5 所示。

根据表 5 所示接头强度的实验结果计算相应因素的平方和、自由度、均方差和 F 值,并进行方差分析,结果如表 6 所示。

表 6 接头强度方差分析表

Table 6 Analysis of variance of bond strength

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F
Factor A	871.54	3	290.51	61.68
Factor B	261.36	6	43.56	9.25
Error	84.80	18	4.7	
Total	1217.70	27		

查表得 $F_{0.01}(3,18) = 5.1 < 61.68, F_{0.01}(6,18) = 4.0 < 9.25$ 。当显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时,因素 A 与因素 B 的各水平对连接接头强度的影响均有显著差异。

结果表明激光功率与加工速度对连接接头强度的影响都是显著的。用 Duncan 多重比较法对显著因素的各水平间进行比较。均值的均方估计值为

$S_{\bar{y}_i} = \sqrt{\frac{S}{b}} = \sqrt{\frac{4.71}{7}} = 0.82028$, 误差自由度为 $f = 6$, 从小到大次序排列如下: $\bar{y}_4 = 69.07, \bar{y}_1 = 74.54, \bar{y}_3 = 79.20, \bar{y}_2 = 84.15$ 。表 7 为因素 A 诸水平平均值比较结果。

表 7 因素 A 诸水平平均值比较结果

Table 7 Comparison results of mean at different levels of factor A

Level	4	1	3
2	15.08	9.61	4.95
3	10.13	7.69	
1	5.44		

由 Duncan 显著极性表查得 $r_{0.05}(5,18) = 3.27, r_{0.05}(6,18) = 3.32, r_{0.05}(7,18) = 3.35$, 由此计算显性极差值: $R_2 = r_{0.05}(2,18)S_{\bar{y}_i} = 0.035492, R_3 = 0.037284, R_4 = 0.03836$ 。

由表 7 可以看出因素 A 的任意两个水平之间的比较值均大于显性极差值,因此任意两个水平之间都是有显著差异的。

比较因素 B 的各水平的均值, $S_{\bar{y}_j} = \sqrt{\frac{S}{a}} = \sqrt{\frac{4.71}{4}} = 1.08513$, 将各水平值从大到小次序排列如下: $\bar{y}_{.7} = 71.38, \bar{y}_{.6} = 74.13, \bar{y}_{.1} = 75.45, \bar{y}_{.5} = 76.84, \bar{y}_{.4} = 79.55, \bar{y}_{.2} = 79.77, \bar{y}_{.3} = 80.06$ 。表 8 为因素 B 诸水平平均值比较结果。

表 8 因素 B 诸水平平均值比较结果

Table 8 Comparison results of mean at different levels of factor B

Level	7	6	1	5	4	2
3	8.68	5.93	4.61	3.22	0.51	0.29
2	8.40	5.64	4.32	2.94	0.23	
4	8.17	5.41	4.09	2.71		
5	5.46	2.71	1.38			
1	4.08	1.32				
6	2.75					

由 Duncan 显著极性表再查得: $r_{0.05}(5,18) = 3.27, r_{0.05}(6,18) = 3.32, r_{0.05}(7,18) = 3.35$, 由此计算显性极差值: $R_2 = r_{0.05}(2,18)S_{\bar{y}_j} = 3.222836, R_3 = 3.385606, R_4 = 3.483267, R_5 = 3.548375, R_6 = 3.602632, R_7 = 3.635186$ 。

由此可见加工速度为 50 与 100 mm/min 之间, 50 与 80 mm/min 之间, 50 与 30 mm/min 之间, 30 与 100 mm/min 之间, 30 与 80 mm/min 之间, 80 与 100 mm/min 之间, 100 与 150 mm/min 之间, 50 与 80 mm/min 之间, 100 与 15 mm/min 之间, 15 与 150 mm/min 之间, 150 与 200 mm/min 之间对连接接头强度无显著差异。其他任意两速度之间对连接接头强度都有显著差异。

由上述分析所得,任意两个相邻速度之间都对连接接头强度无明显差异,说明本实验中所选的速度水平密集未能有效区分,也说明本实验中所选连接接头强度整体变化不大,均在 60~90 MPa 之间。对于非相邻两速度如 50 与 100 mm/min 之间, 30 与 100 mm/min 之间, 30 与 80 mm/min, 100 与 15 mm/min 之间, 15 与 150 mm/min 之间, 在相近的连接接头强度的要求下,可以通过选择较高的加工速度以获得更高的加工效率。

4 结 论

使用半导体连续激光器,功率在 4~5.5 W 之间,加工速度在 0~400 mm/min 时,采用激光透射连接工艺可以将 PET 薄膜与薄钛板进行连接。接头成形美观,表面无破损,均匀平滑,无明显缺陷。所得的连接接头宽度在 0.64~1.38 mm 之间,接头强度在 65.46~90 MPa 之间。

当激光热输入量较小时,PET 薄膜与薄钛板之间未能充分作用;而当热输入量较大时,PET 薄膜又可能发生部分分解和烧蚀,这都使所得的连接接头强度较低。由此可得到 PET 薄膜与薄钛

板激光透射连接的工艺参数窗口,可为激光透射连接时选取合适的工艺参数提供指导。

采用方差分析与 Duncan 多重比较法对连接接头质量进行分析,得到了激光器功率与加工速度对连接接头质量的影响规律。

参 考 文 献

- 1 Wang Lisha, Luo Yanhong. CRTER's topics of interest in 2008; Medical implant research [J]. *Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2007, **11**(48): 9771~9776
王莉莎,罗艳红. 2008年CRTER重点组稿内容之一: 医学植入体研究[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2007, **11**(48): 9771~9776
- 2 Tonfiz Uddin Mahmood. Laser microjoining of dissimilar materials[D]. Wayne State University Dissertation, 2008
- 3 H. J. Herfurth, R. Witte, S. Heinemann. Microjoining of dissimilar materials for life science applications[C]. *SPIE*, 2003, **5063**: 292~296
- 4 Wang Ming, Song Xiping. Study actuality of corrosion, mechanical compatibility and biocompatibility of titanium alloys for medical application[J]. *Titanium Industry Progress*, 2008, **25**(2): 13~18
王 明,宋西平. 医用钛合金腐蚀、力学相容性和生物相容性研究现状[J]. 钛工业进展, 2008, **25**(2): 13~18
- 5 Zhao Di, Huang Wenchan. Advance in research on bioactive glass composites for bone repair[J]. *Function Materials*, 2008, **39**(3): 353~357
赵 荻,黄文焜. 骨修复用生物玻璃复合材料研究进展[J]. 功能材料, 2008, **39**(3): 353~357
- 6 Jiao Yongfeng, Zhao Lei. The development and current status of bioceramics[J]. *Jiangsu Ceramics*, 2008, **41**(2): 7~12
焦永峰,赵 磊. 生物陶瓷材料的研究进展[J]. 江苏陶瓷, 2008, **41**(2): 7~12
- 7 Zhang Jun, Hu Xingbin, Li Xiong. Application of biomedical polymer materials in medicine[J]. *Chinese Hospital Architecture & Equipment*, 2008, (1): 30~35
章 俊,胡兴斌,李 雄. 生物医用高分子材料在医疗中的应用[J]. 中国医院建筑与装备, 2008, (1): 30~35
- 8 Grigor Lyubomirov Georgiev. Chemical bond formation and characterization of laser bonded dissimilar materials[D]. Wayne State University Dissertation, 2008
- 9 Ankitkumar Dhorajiya. Mechanical and heat transfer finite element modeling of transmission laser micro joining[D]. Wayne State University Dissertation, 2008
- 10 A. Mian, G. Newaz, L. Vendra *et al.*. Laser bonded microjoints between titanium and polyimide for applications in medical implants[J]. *Materials Science: Materials in Medicine*, 2005, **16**(3): 229~237
- 11 G. G. Daniel, S. Taslema, A. Mian *et al.*. Laser fabrication and characterization of sub-millimeter joints between polyimide and Ti-coated borosilicate glass[J]. *Materials Science*, 2005, **40**(21): 5641~5647
- 12 S. Taslema, L. Grigor, A. Greg *et al.*. XPS analysis of laser transmission micro-joint between poly (vinylidene fluoride) and titanium [J]. *Applied Surface Science*, 2008, **255**(2): 2569~2573
- 13 L. Grigor, S. Taslema, J. Ronald *et al.*. XPS study of laser fabricated titanium/KaptonFN interfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2008, **254**(22): 7173~7177
- 14 L. Grigor, J. Ronald, F. Erik *et al.*. Chemical bond formation during laser bonding of Teflon FEP and titanium[J]. *Applied Surface Science*, 2009, **255**(15): 7078~7083
- 15 Su Junhe. Testing Design[M]. Shanghai: Shanghai University of Finance & Economics Press, 2005
苏均和. 试验设计[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2005
- 16 Liu Huixia, Li Pin, Xing An *et al.*. Laser transmission welding of thermoplastic polyurethane films[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 156~160
刘会霞,李 品,邢 安等. 热塑性聚氨酯弹性体(TPU)薄膜激光透射焊接工艺[J]. 中国激光, 2009, **36**(s1): 156~160
- 17 Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guomin *et al.*. Laser transmission welding polypropylene plastics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 466~471
王 霄,张惠中,丁国民等. 聚丙烯塑料激光透射焊接工艺[J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 466~471
- 18 Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong *et al.*. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1801~1807
刘会霞,邢 安,张惠中等. 聚氯乙烯激光透射焊接温度场的有限元模拟[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1801~1807