

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.09.030

塑料激光透射焊接原理及材料影响因素探析

岳贵成,高健峰,薛长鸣

(上海亚大汽车塑料制品有限公司,上海 201708)

摘要:首先介绍了塑料激光透射焊接的原理,焊接工艺对选材的要求。其次,探析了材料对激光透射焊接的影响因素,分析了增韧、增强、材料配色以及厚度对透光率的影响,同时对现阶段激光吸收剂的使用情况进行了综述。最后,针对目前制造过程中遇到的问题,对激光焊接材料提出了新需求。

关键词:塑料;激光透射焊接;原理;材料影响因素

中图分类号: TQ320.67 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)09-0155-04

Analysis on Principle and Material Influence Factors of Plastics Laser Transmission Welding

Yue Guicheng, Gao Jianfeng, Xue Changming

(Shanghai Chinaust Automotive Plastics Corp., Ltd., Shanghai 201708, China)

Abstract : Firstly, the principle of laser transmission welding and the requirement of welding material selection were introduced. Secondly, the material influence factors on laser welding are analyzed from some aspects. The influence of material toughened, reinforced, color matching, and thickness on transmittance were analyzed respectively. The application of laser absorbents at present was summarized. Finally, in view of the problems encountered in the current manufacturing process, the new requirements for laser welding materials were put forward.

Keywords : plastics ; laser transmission welding ; principle ; material influence factor

塑料激光焊接起源于20世纪70年代,最早是利用CO₂激光器对塑料类薄膜材料进行焊接^[1]。随着汽车工业的发展,丰田汽车在1985年开发了激光透射焊接技术并成功应用在汽车塑料部件的连接上,但由于当时激光设备成本高,该技术并未得到大规模的推广^[2]。21世纪以来,随着科学技术的发展、激光设备成本的降低以及各个领域对精度要求的提高,热塑性塑料激光透射焊接已被广泛应用在汽车、医疗器械、航空航天、3C电子等诸多领域^[3-6]。

塑料激光透射焊接与传统的超声波焊接、摩擦焊等焊接方式相比,不需要有强烈的机械振动或较大的机械压力,连接过程中不会对精密部件产生内部振动损伤,更不会对产品外观造成机械损伤^[7-8]。塑料激光焊接同时还具备自动化程度高、焊接速度快、焊缝在连接区内部、制品表面美观、无焊渣产生等诸多优点,特别适合制造一些对清洁度要求高的制品,譬如汽车发动机进气系统、燃油系统的零部件等^[9-10]。激光透射焊接是目前汽车领域非常成熟的环境友好型、可大

规模进行塑料部件连接的加工工艺^[11-12]。

1 塑料激光透射焊接的原理

由于目前在塑料激光透射焊接中使用的光源主要为近红外光,所以塑料透射激光焊接也常被称之为塑料透射红外焊接^[13-14]。在焊接过程中材料或部件通常采用搭接的方式进行连接,焊接原理示意图如图1所示,聚合物在激光透射焊接过程中通常需要满足材料透光、材料吸光、膨胀熔融这些条件。

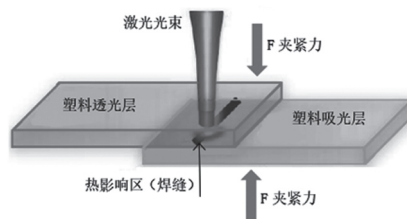


图1 激光透射焊接原理图

首先,激光透射焊接使用的塑料必须是热塑性塑料,焊

通信作者: 高健峰,工程师,主要从事聚合物材料的应用及工艺研究

收稿日期: 2021-07-01

引用格式: 岳贵成,高健峰,薛长鸣. 塑料激光透射焊接原理及材料影响因素探析[J]. 工程塑料应用,2021,49(9):155-158.

Yue Guicheng, Gao Jianfeng, Xue Changming. Analysis on principle and material influence factors of plastics laser transmission welding[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):155-158.

接过程中材料受热熔融后再凝固的过程是可逆的^[15-16]。为保证焊接强度,建议焊接选用的上、下层材料优先为同种材料。若上、下层材料不同,需考虑材料的熔点尽可能接近或相差不大,同时两种材料需具有相似的极性,确保在受热熔融状态时两种材料可以相容。

其次,焊接过程中上层材料需具备透射激光的能力,生产制造过程中对上层材料有透光率的要求(透光率 $\geq 25\%$),通用塑料及工程塑料中的本色塑料大多都可以透光激光。下层材料则相反,需要具有吸收激光的功能,激光在吸光层被吸收并转换为热量。

最后,上、下层材料或部件在夹紧力的作用下完成热传递,产生膨胀并熔融,冷却后在内部结合处形成焊缝,从而使部件紧密地连接在一起。

2 激光透射焊接中材料的影响因素

塑料激光透射焊接的本质与其它焊接方式相同,是材料自身熔融再凝固的过程,所以选用的材料都为热塑性塑料。为保证焊接后具有良好的力学性能,除特殊特性外,目前大多都选用同材质进行焊接,可以避免材料间熔点差异、分子间极性不同、相容性差等问题。在汽车燃油系统、进气系统、冷却系统、电子电器系统中聚丙烯(PP)^[17-18]、尼龙(PA)^[19]、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料^[20-22]、聚对苯二甲酸丁二酯^[23-24]、聚甲基丙烯酸甲酯^[25]等是常被用来做激光焊接部件的材料。

2.1 材料透光率的研究

激光透射焊接中的光并非为肉眼可见光,而是近红外光。半导体激光器是目前使用较多的光源,产生波长范围为808~1064 nm,在这个波段的光可以被用作塑料透射焊接,大部分塑料在该波长范围内具有40%~95%的透光率^[26]。

热塑性塑料分为无定型结构、半结晶结构。无定型结构塑料由于分子内部没有晶区,材料呈现出优异的透光性能。半结晶塑料由于分子内部有晶区存在,结晶区会抑制材料的透光性。同时材料在进行增强、增韧改性、不同配色后,透光率都会发生较大的变化^[27-28]。

(1) 增韧、增强改性对材料透光性的影响。

对笔者所在公司生产、在使用的PA66类材料进行透光率测试,材料分别为:非增强耐热规格本色PA66(23℃缺口冲击强度5.5 kJ/m²)、非增强冲击改性规格本色PA66-I(23℃缺口冲击强度80 kJ/m²)、30份玻纤增强规格本色PA66-GF30,材料试片厚度均采用2 mm。利用公司自主研发组装的透光率检测设备(波长940 nm,功率30 W)对试片进行透光率检测。

透光率检测数据见表1所示,PA在进行增韧、增强改性后,透光率都有衰减,玻纤增强PA透光率衰减较小,填充30

份玻纤后透光率仍能保持在63%,对焊接没有影响。冲击改性后的PA66-I材料,由于填充的增韧剂较多,其透光率衰减较大,仅保留了17%的透光率,笔者尝试用试验的PA66-I材料与其对应的黑色材料进行焊接,需要较高的功率、极慢的速度才能完成焊接,且焊接质量不理想、效率低,对生产制造的影响较大。

表1 不同规格本色PA66透光率的变化

尼龙种类	规格	厚度/mm	透光率/%
PA66	非增强、耐热	2.0	81
PA66-I	非增强、改性冲击	2.0	17
PA66-GF30	30份玻纤增强	2.0	63

(2) 材料配色对透光性的影响。

通常在激光焊接中是选用本色与黑色材料进行焊接,由于本色材料自身大多都可以透光,满足激光透射焊接的要求。但随着客户要求的不断增加,黑色透光材料的需求也不断增多。据调研,选用对近红外光吸收性较弱的染料进行配色,可实现黑色材料透激光的需求。不同颜色的蒽醌、紫环酮^[29]按一定的比例混合配色是目前科研、企业改性中常用的颜料,蒽醌、紫环酮自身就是染料,具有良好光、热稳定性。

在实际应用中发现,虽然外观上都是黑色,但由于颜料配色及比例的不同,其材料断面呈现出不同的颜色。行业常用灯光照射材料,根据材料背面的反光情况来判断材料的透光性。

用普通灯光照射黑色透光试片,在试片的背面也将呈现出不同颜色的光斑。对在用的PA66-GF30及PA12-GF30各选取三家供应商试片进行灯光照射及透光率检测,分别再选一个本色材料作为对比试样,PA66-GF30依次记作A1, A2, A3, A4(NC), A4(NC)为本色;PA12-GF30依次记作B1, B2, B3, B4(NC), B4(NC)为本色,透光率数据见表3。

表2 不同供应商PA66-GF30、PA12-GF30透光率的变化

材料类型	试样	厚度/mm	材料断面颜色	光斑颜色	光斑明亮度	透光率/%
PA66-GF30	A1	2.0	灰白色	粉红	明亮	45
	A2	2.0	灰白色	红色	较暗	58
	A3	2.0	浅绿色	绿色	明亮	52
	A4(NC)	2.0	本色	灯光颜色	明亮	63
PA12-GF30	B1	2.0	灰白色	蓝色	明亮	38
	B2	2.0	浅紫色	紫色	明亮	24
	B3	2.0	灰白色	无明显光亮		64
	B4(NC)	2.0	本色	灯光颜色	明亮	68

各材料厂由于自身配色、改性的不同,相同厚度的黑色PA66-GF30, PA12-GF30材料在灯光照射下会呈现出不同的光斑颜色,该方法可作为判定材料牌号的方式。目前还没有明确的数据可表明什么颜色的光斑对透光率的影响较大,试验中也发现部分试样灯光照射后光斑颜色暗淡(A2)甚至无明显光亮(B3)透过,但材料自身在进行透光率检测时却

呈现出良好的透光率。因此,采用灯光照射的方法来判定材料是否透光只能作为一种简易的检测手段,并不适用于所有材料,建议使用专业设备进行材料透光率的检测。

(3) 材料厚度对透光性的影响。

在产品焊接过程中,焊接区厚度也是影响焊接的重要因素。焊接区厚度过薄,产品在爆破及长周期试验中有不合格的风险。焊接区域过厚,材料的透光率会降低,会造成焊接不充分、焊接效率低等现象,则会导致产品在密封、爆破测试中不合格。

F. Chabert 等^[30]在进行焊接强度时发现,PA6材料随着厚度的变化,透光率呈下降趋势。岳贵成等^[31]进行了PA66-GF30厚度对透光率影响的相关研究,结果表明,材料厚度从1 mm增加至2 mm,3 mm,透光率也是逐渐减小的。为保证产品焊接后的优异性能以及加工过程中的效率,定义合适的焊接厚度尤为重要。目前对于结构部件的设计,焊接区厚度一般控制在1.5~2.0 mm为佳。

(4) 其它因素对材料透光率的影响。

除上述的影响因素外,材料自身在改性过程中对透光率的影响也较大。半结晶型塑料分子内部存在结晶区与无定形区,结晶可以增大材料的力学性能、热性能,但结晶会使材料变得不透明,内部分子排列更加紧密,这些都将影响到材料透光性^[32]。同时,球晶尺寸也会影响材料的透光性,球晶尺寸过大,激光在结晶区与无定形区的界面处发生光散射,从而降低材料的透光率。

材料在前期改性及后期加工过程中,保证材料强度的同时,合理控制材料的结晶度、结晶速率、球晶尺寸都可以提升材料的透光率。

2.2 材料吸收激光的分析

激光焊接的吸光层、部件或材料式样必须具有吸收激光的能力,岳贵成等^[31]在试验中发现,若吸光层材料无激光吸收剂填充,焊接是失效的。在汽车应用领域,吸光层材料普遍以黑色居多,炭黑就成为了常用的近红外光吸收剂。利用炭黑吸收激光能量并将其转化为热能,该过程是由聚合物内部炭黑的分散水平及尺寸来控制的^[33]。聚合物中填充炭黑的粒径、浓度对焊接过程的影响较大。

E. Haberstroh 等^[34]研究发现,吸收激光的聚甲醛材料中分别加入粒径为20 nm和60 nm的炭黑,20 nm炭黑填充的材料获得了更高的焊接强度。在材料中添加不同浓度的炭黑,高浓度炭黑含量的POM在焊接中获得了较高的焊接强度。

Donghun No 等^[35]在进行激光焊接能量吸收时发现,并不是炭黑的含量越高得到的吸光效果越好,在厚度为0.09 mm的黑色高分子薄膜中逐渐提高炭黑含量,炭黑质量

分数在0.07%时薄膜内部吸热效果最好,当其质量分数继续提高时薄膜内温几乎无变化,反而会造成表面温度过高发生材料降解的可能。

Chen Mingliang 等^[36]在进行炭黑对热塑性塑料激光焊接影响时发现,在相同炭黑含量的PA6与聚碳酸酯(PC)中,PC材料吸收激光的能力要高于PA6,除了材料密度影响外,炭黑颗粒在PC中的平均粒径要小于在PA6中的平均粒径。

炭黑作为激光吸收剂,其缺点是不仅可以吸收近红外光,对其它波段的光也具有很强的吸收性,会使得焊接部位颜色与基材自身不同,影响美观^[37]。

除炭黑外,其它激光吸收剂也正在研究及应用。英国焊接学会发明了Cleanweld近红外光吸收剂,可以涂敷在激光吸收层或混合在高分子材料中,从而实现透明塑料之间的激光焊接。BASF公司开发了Lumogen系列的激光吸收剂,可以实现不同波长下近红外光的吸收,有利于特殊波长激光器的焊接。青岛德达志成化工有限公司于2015年推出近红外光吸收剂NIR,其具有使用添加比例少,与大多数塑料都良好相容的优良特性,混合注塑或作为涂覆层,都能达到良好的焊接效果^[37]。

除有机材料外,无机金属类材料也可作为激光吸收剂。Liu Minqiu 等^[38]在2018年首次研究了一种利用金属作为塑料激光焊接吸收剂的方法。研究中对1.5 mm聚对苯二甲酸乙二酯材料进行焊接,采用金属铁与炭黑作为激光吸收剂,对比发现,金属作为吸光剂,焊接接头同样干净、无杂质,且具有更高的焊接强度,研究同时发现焊接强度与光吸收剂的导热系数呈正相关关系。除金属铁外,近几年锌粉^[39]、铝粉^[40]等金属也被学者作为吸光剂进行了研究。与此同时,无激光吸收剂的塑料焊接也正在被研究中,M. Frederik^[41],N. P. Nguyen 等^[42]团队通过改进焊接设备及工艺实现了无激光吸收剂的塑料焊接。

3 激光透射焊接对材料的新挑战

激光透射焊接在汽车、医疗、3C产品等高端制造领域具有不可取代的地位,但随着应用需求的不断提高,激光透射焊接对材料有着越来越多的新需求。

(1) 增韧、透激光材料。

材料在进行冲击改性时需要增添较多的增韧剂,会严重影响材料的透光率,造成焊接效率低、焊接质量不理想。

(2) 导电、透激光材料。

在汽车燃油系统中,部分部件为了实现释放静电的功能需要在材料中添加碳纤维、石墨烯、碳纳米管等碳制品。研究发现,碳制品有着较好的近红外光吸收性,目前在导电部件连接时,多采用优化结构的方式,借助一个透光、非导电的母材同时将两个导电部件焊接在一起。

(3) 阻燃、透激光材料。

在汽车新能源领域,越来越多的材料要求 UL 94 V-0 级阻燃,这使得材料改性中需要添加较多比例的阻燃剂。特别是溴系阻燃剂对材料透光率的影响较大,目前阻燃材料的激光透射焊接比较困难。

(4) 异材之间激光焊接。

在总成连接过程中,考虑到产品的刚性、韧性以及使用环境,各分零件之间或许会出现异材的情况,例如不同半结晶材料之间的连接,半结晶材料与无定型材料之间的连接。考虑到材料分子间的极性的差异,目前异材之间的连接还是多采用胶粘、铆接、竹节、卡箍或其它机械连接的方式。

激光透射焊接对材料的新挑战不仅仅限于上述的需求,随着高端制造业的快速发展以及使用环境的越发严苛,激光焊接对材料的匹配性要求也将越来越高,不断优化、改进材料体系满足用户需求是塑料激光焊接发展的必经之路。

参考文献

- [1] Hilton P A, et al. Laser welding of fabrics using infrared absorbing dyes[C]//International Conference on Joining of Advanced and Speciality Materials III, ASM, October 9-12, 2000, St.Louis, Missouri, USA.
- [2] Jones I. Laser welding of plastics[M]//Handbook of Laser Welding Technologies. Woodhead Publishing, 2013: 280-301.
- [3] 张振珠. 塑料科技, 2019, 47(7):55-58.
Zhang Zhenzhu. Plastics Science and Technology, 2019, 47(7):55-58.
- [4] 张玉坤. 合成材料老化与应用, 2019, 48(2):139-143.
Zhang Yukun. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(2):139-143.
- [5] 王燕, 等. 医疗装备, 2018, 31(5):196-199.
Wang Yan, et al. Medical Equipment, 2018, 31(5):196-199.
- [6] 李琳. 焊接技术, 2020, 49(3):1-4.
Li Lin. Welding Technology, 2020, 49(3):1-4.
- [7] 曹晨, 等. 激光杂志, 2021, 42(2):1-4.
Cao Chen, et al. Laser Journal, 2021, 42(2):1-4.
- [8] 肖海霞, 等. 塑料工业, 2019, 47(8):69-71, 75.
Xiao Haixia, et al. China Plastics Industry, 2019, 47(8):69-71, 75.
- [9] 王蕾. 塑料工业, 2019, 47(9):74-76, 65.
Wang Lei. China Plastics Industry, 2019, 47(9):74-76, 65.
- [10] 孔茗, 等. 塑料科技, 2018, 46(12):68-71.
Kong Ming, et al. Plastics Science and Technology, 2018, 46(12):68-71.
- [11] Acherjee B. Optics & Laser Technology, 2020:106 737.
- [12] Acherjee B. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60:227-246.
- [13] Wang Chuanyang, et al. Infrared Physics & Technology, 2021, 112.
- [14] Kumar D, et al. Materials Today: Proceedings, 2020.doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.422.
- [15] Andreas Schkutow, et al. Procedia CIRP, 2020, 94:697-701.
- [16] Lakemeyer P, et al. Weld World, 2017, 61: 1 247-1 252.
- [17] M-L Röhrich, et al. Procedia CIRP, 2020, 94:691-696.
- [18] Kumar N, et al. Procedia CIRP, 2019, 81(C):1 272-1 277.
- [19] 叶少勇, 等. 塑料工业, 2019, 47(4):147-151.
Ye Shaoyong, et al. China Plastics Industry, 2019, 47(4):147-151.
- [20] 全源, 等. 应用激光, 2021, 41(1):131-135.
Tong Yuan, et al. Applied Laser, 2021, 41(1):131-135.
- [21] 张杰. 塑料科技, 2019, 47(12):75-78.
Zhang Jie. Plastics Science and Technology, 2019, 47(12):75-78.
- [22] 上官同英, 等. 应用激光, 2019, 39(1):93-97.
Shangguan Tongying, et al. Applied Laser, 2019, 39(1):93-97.
- [23] 王永科, 等. 塑料, 2020, 49(5):85-87, 128.
Wang Yongke, et al. Plastics, 2020, 49(5):85-87, 128.
- [24] 武海军. 塑料科技, 2019, 47(11):82-84.
Wu Haijun. Plastics Science and Technology, 2019, 47(11):82-84.
- [25] Hubeatir K A. Materials Today:Proceedings, 2020, 20:466-473.
- [26] 陈志, 等. 应用激光, 2020, 40(3):556-563.
Chen Zhi, et al. Applied Laser, 2020, 40(3):556-563.
- [27] Fernandes F A O, et al. Polymers, 2020, 12(2):402.
- [28] Helle Østergren Bak, et al. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2018, 56:2 245-2 254.
- [29] 钟欢欢. 高透光性黑色塑料制备及其激光焊接性能研究 [D]. 华南理工大学, 2015.
Zhong Huanhuan. Research on properties of laser welding of prepared high transmission black thermoplastic[D]. South China University of Technology, 2015.
- [30] Chabert F, et al. Procedia Manufacturing, 2020, 47:962-968.
- [31] 岳贵成, 等. 汽车实用技术, 2021, 46(7):129-132.
Yue Guicheng, et al. Automobile Applied Technology, 2021, 46(7):129-132.
- [32] Dave F, et al. Polymers, 2021, 13(5):675.
- [33] Wang C Y, et al. Welding in the World, 2007, 51(3):85-90.
- [34] Haberstroh E, et al. Journal of Polymer Engineering, 2001, 21(2):119-129.
- [35] No Donghun, et al. A study of the combined socket and butt welding of plastic pipes using through transmission infrared welding[D]. The Ohio State University, 2005.
- [36] Chen Mingliang, et al. Journal of Materials Processing Tech, 2011, 211(1):43-47.
- [37] Herthoge M, et al. Journal of Mechanical Working Technology, 2020.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116681.
- [38] Liu Minqiu, et al. Optics & Laser Technology, 2018, 105:242-248.
- [39] 王超, 等. 应用激光, 2020, 40(4):677-684.
Wang Chao, et al. Applied Laser, 2020, 40(4):677-684.
- [40] 颜廷培, 等. 应用激光, 2019, 39(5):813-819.
Yan Tingpei, et al. Applied Laser, 2019, 39(5):813-819.
- [41] M. Frederik, et al. Procedia CIRP, 2020, 94:686-690.
- [42] Nguyen N P, et al. Welding in the World, 2020, 64:1 227-1 235.