

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.06.030

塑料激光焊接技术的研究动态和发展趋势

周克良,覃晴,卢豆豆

(江西理工大学机电工程学院,江西赣州 341000)

摘要:首先从塑料激光焊接的优点、焊接原理、焊接方法、基本工序四个方面介绍了塑料激光焊接技术。其次,从焊接工艺、数值模拟、工艺参数、吸收剂、控制软件、微观焊接和激光器七个方面对近年来塑料激光焊接领域的理论研究进行了综述,并对国内外产业最新研究进行了阐述。最后对塑料激光焊接技术的发展趋势进行预测和展望。

关键词:塑料焊接;焊接原理;研究动态;发展趋势

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)06-0177-06

Research Trends and Development Trends of Plastic Laser Welding Technology

Zhou Keiliang, Qin Qing, Lu Doudou

(School Mechanical of Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract : The plastic laser welding technology from four aspects : the advantages of plastic laser welding, welding principle, welding method and basic process was firstly introduced. Secondly, the theoretical research in the field of plastic laser welding in recent years was reviewed from seven aspects : welding process, numerical simulation, process parameters, absorber, control software, micro welding and laser. The latest research on the industry at home and abroad was expounded. Finally, the development trend of plastic laser welding technology was predicted and prospected.

Keywords : plastic welding ; welding principle ; research trend ; development trend

近些年来,塑料作为石油加工过程中附带的一种产品,随着石油的大量开采和石油化工行业的快速发展,以其易获得、成本低、加工成型工艺简单快速、物理性能良好(比如耐腐蚀、摩擦力小、强度高)、具备各种工程特性、产品质量低等优点,在各行各业中得到了大规模的使用。现如今,全球工业致力于贯彻绿色环保、节能减排发展理念,塑料作为一种性能优越的可再生非金属材料,可代替钢铁、铝、镁等金属以及其他一些非金属材料在实际生产中的使用,被广泛应用于日常生活和工业制造中,在电子器件、仪器仪表、玩具生产、精密器械、汽车制造、服装服饰、建筑建材、礼品包装、金银首饰等行业的运用越来越普遍。

在汽车工业的高速发展过程中,世界各个国家对汽车行业提出了节约能源、保护自然环境、改善安全性能的可持续发展目标。而轻量化设计是降低汽车总质量,减少排放,增加有效载荷,减少成本的最有效方法之一,已经成为汽车

制造业发展的一个重要方向。塑料作为一种性能优越的替代品,越来越多地代替金属部件用于汽车制造中,是轻量化设计中最重要方法之一。鉴于车用部件的特殊使用要求,一些结构和形状复杂的塑料工件并不能一次就加工成型,需要一种工艺手段将多个零件无缝焊接到一起。

塑料和复合材料的连接方法有三种:黏合连接、机械连接和焊接^[1]。黏合连接是使用粘接剂将零件连接起来,零件表面需要进行打毛、涂胶、黏结、固化等工序,该方法工序多、质量差、操作复杂、生产效率低、劳动强度高,而且损害操作人员健康,容易污染环境;机械连接常采用卡环、螺钉等单独的紧固件,作为压合或铆合接头连接,使用该方法不仅连接表面质量得不到保证而且强度也不易达到要求;焊接是通过加热使塑料界面软化或熔化,经过一定的压力和时间,高分子链通过界面扩散形成链纠缠,最后得到焊点的强度。

按采用的加热方式,塑料焊接方法可分为外加热和内

基金项目: 国家自然科学基金项目(61363011),江西省自然科学基金项目(20151BAB20724)

通信作者: 周克良,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为过程控制与网络集成自动化、激光设备及应用等

收稿日期: 2022-04-10

引用格式: 周克良,覃晴,卢豆豆. 塑料激光焊接技术的研究动态和发展趋势[J]. 工程塑料应用,2022,50(6):177-182.

Zhou Keiliang, Qin Qing, Lu Doudou. Research trends and development trends of plastic laser welding technology[J]. Engineering Plastics Application,2022,50(6):177-182.

加热。外加热利用热导或对流加热焊接面。内加热是利用工艺在材料内部加热,以替换外部热源,包括电磁加热和机械加热。相比于其他焊接方式,电磁加热法产生的振动力和热应力小,即经过焊接的焊接件更稳定、老化速度更慢,更适合精密仪器或易损坏的制品。相比于其他焊接方式,电磁加热法中的激光焊接所产生的振动力和热应力小,即经过焊接的焊接件更稳定、老化速度更慢,更适合精密仪器或易损坏的制品如医疗器械或电力电子器件的制造。为此,激光焊接技术以其变形小、热影响区小、焊缝平整美观、老化速度慢以及焊缝精密、牢固和密封的优势,为工业生产中不能一次性加工成型的形状和结构复杂的塑料产品提供了新技术手段。

1 塑料激光焊接技术

1.1 塑料激光焊接的优点

目前,国内较为普遍的焊接技术有摩擦焊接、超声波焊接和热气焊接等,同传统的塑料焊接技术相比,塑料激光焊接技术主要有以下几方面的优点:

(1) 加热和冷却速度极快,极大地减小了塑料制品的热应力和振动应力。

(2) 激光焊接控制简单,属于非接触加工,适应性强,对于结构复杂或焊件微小均有很强的操作性。

(3) 随着激光焊接设备的不断升级,其成本进一步下降,性能不断提高,相比于其他焊接设备,具有容易维护、操作方便、支持长期使用等优点。

(4) 经过激光焊接的焊件质量好,焊缝牢固、精密、稳定,而且焊接过程中不产生污染,是一种非常环保的焊接技术。

(5) 激光焊接,适用性强,能在多种条件下进行焊接而且能保证焊件质量,比如在真空、空气或某种介质的环境中,还可以透过透明塑料对焊件接触面进行焊接。

1.2 塑料激光焊接的基本原理

透过式焊接容易控制,且是应用最广泛的一种焊接方式。透过式焊接方式的原理是:采用不同材质的两种热塑性塑料,一种对激光透明,另一种具有较高的吸收度,二者在低压力下被夹紧在一起,当激光穿过透明的塑料制品,然后被另外一个具有一定吸收度的塑料制品吸收时,吸收激光能量的制品将光能转化为热能,在塑料的接触面熔化,由于材料的扩散作用最终在界面形成一个瞬时焊接区。采用透过方式焊接两片塑料样品的示意图如图1所示。

1.3 常用的激光焊接方法

塑料激光焊接的方法主要有:轮廓焊接、同步焊接、准同步焊接和照射掩膜焊接。

轮廓焊接:沿着焊接区域的轮廓线移动进行焊接;或者将被夹层沿着激光束移动进行焊接。其原理图如图2a所示,灵活性好,高自由度,适用于焊接各种性质复杂的二维或三

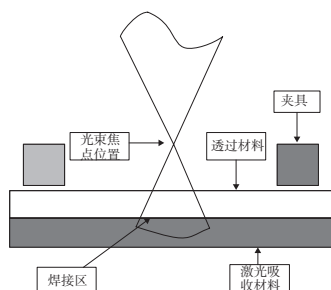


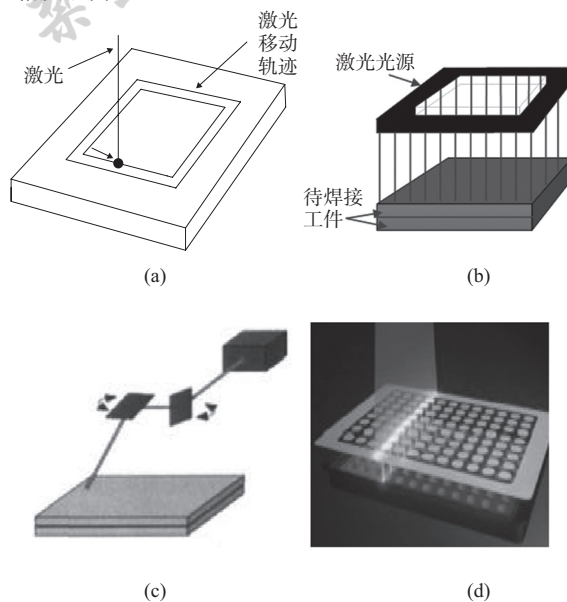
图1 焊接原理图

维焊件。

同步焊接:将多个二极管激光束透射到焊接区域进行焊接。其原理图如图2b所示加工周期短,热变形量较小,适用于一定规模的批量生产。

准同步焊接:利用反射镜使激光束高速对焊接区域进行焊接。其原理图如图2c所示。灵活性好,自由度较高,适用于简单的平面二维焊接。

掩膜焊接:在激光束和待焊部件之间放入一个模板,使激光束对模板进行精确焊接,使用这种技术可以实现低至 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的高精度焊接。掩膜焊接是瑞士 Leister 公司的专利技术。其原理图如图2d所示。可焊接任何平面几何形状,且精度极高。



a—轮廓焊接;b—同步焊接;c—准同步焊接;d—掩膜焊接

图2 几种常见的焊接方式

1.4 塑料激光焊接的基本工序

塑料激光透射焊接技术的基本工作过程为:

(1) 将一个透光的塑料焊件和一个吸光或添加了吸收剂的塑料焊件叠放在一起,利用夹具并施一定的压力使两个焊件接触面充分接触;

(2) 控制一束激光依次穿过透光焊件和吸收焊件,使得激光穿过透光焊件,到达吸光焊件;

(3) 通过振镜控制激光的运动轨迹和速度,使激光按照预先设定的轨迹和速度照射焊件接触面;

(4) 接触面下方的吸光焊件吸收激光能量并产生热量,经过热传导作用使得焊接接触面熔化,在夹具压力下,熔融状态下的塑料充分混合;

(5) 关闭激光,熔融状态下的焊接接触面随着激光能量的减少逐渐冷却,形成牢固的焊缝,焊件紧紧连接在一起。

2 国内外研究动态

塑料激光焊接技术是利用激光束传导热量使焊件面受热熔化,并在一定的挤压压力下焊件形成牢固、精密的焊缝的技术。塑料激光焊接技术早期出现应用时,相比于更早的塑料粘接技术,激光焊接技术成本高昂,其实际应用和推广受到限制。然而,随着近些年科技的不断发展,塑料激光焊接设备和材料的费用开始下降,基于塑料激光焊接技术高效、稳定、无振动等优势,该技术越来越受到人们的欢迎,并大规模应用于工业生产中。

2.1 国外理论研究

国外在塑料激光焊接方面的研究一直都领先国内,不仅研究的更早,而且研究的更广泛、更深入。主要可以概括为以下几个方面:

(1) 焊接工艺。

在焊接工艺方面, Bonten 等^[2]研究了红外辐射加热的物理原理,对不同材料的表面和体积吸收进行了划分,并对红外灯和激光器的优缺点进行了综述。Wang 等^[3]采用增量扫描模式和常规轮廓焊接模式对 0.5 mm 厚聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 板的激光透射焊接进行了研究,结果表明,与常规轮廓焊接相比,采用增量扫描方式焊接的焊缝抗剪强度和密封能力均处于相同水平。Brodhun 等^[4]研究了一种基于激光传输的连接工艺,将一种对外加激光辐射透明的热塑性粘结剂与另一种粘结剂作为热固性碳纤维增强塑料连接。Schkutow 等^[5]研究了光纤激光器在允许控制焊缝宽度条件下的不同扫描策略。Cosson 等^[6]利用有限元软件建立了激光焊接的三维瞬态热模型,并通过求解能量平衡方程来研究加热阶段,开发了一种光线追踪法与有限元软件结合起来计算模拟中使用的热源项。

(2) 数值模拟。

塑料激光焊接过程伴随着众多物理现象,比如热现象,对这些现象进行数值模拟有助于分析塑料激光焊接机理。2008 年, Wilke 等^[7]采用简化的数学物理模型,采用有限元方法进行了计算,模拟了准同步和同步激光焊接过程,研究确定了激光强度、升温时间以及连接压力对焊缝质量的影响。2020 年, Nguyen 等^[8]研究了透明塑料无吸收剂条件下准同步激光焊接的建模与热模拟,考察了不同参数对热影响

区的影响。2021 年, Acherjee 等^[9]提出异种塑料激光透射焊接的三维有限元模型,在模型开发过程中,考虑了焊接过程中相关的主要热现象,通过焊接试验对数值模型进行了验证,模型预测的模拟结果与实测吻合较好。

(3) 工艺参数。

影响塑料激光焊接过程和结果的因素很多,比如焊接的激光功率、焊接速度、焊接时间、光斑直径大小、焊接材料和吸收剂品种等,一般采用控制变量法的方法逐一地对各个参数进行试验分析。针对焊接工艺参数,国外的研究开展的较早,并取得了不少成果:2002 年, Kagan 等^[10]测定了特定因素如玻璃纤维、添加剂等对近红外透射性能的影响,研究了不同激光焊接工艺条件(激光功率、焊接速度、激光光斑直径、塑料颜色、夹紧压力等)下剪切对接头的力学性能。2019 年, Rudrapati 等^[11]研究了聚碳酸酯 (PC) 塑料的透射激光焊接中,焊接输入参数功率、扫描速度和光束直径对最大焊缝界面温度和焊缝宽度的影响。2020 年, Nguyen 等^[12]采用集成高温计的三维扫描仪对聚酰胺准同步激光透射焊接过程中的温度进行了表征和测量,并进行热过程模拟,根据模拟温度场计量两种聚合物的热辐射,发现检测到的热辐射 90% 以上来自连接区域。

(4) 吸收剂。

适用于塑料激光焊接技术的塑料一般是热塑性塑料,而且要求对激光具有一定的吸收能力,而实际塑料往往吸光能力并不足以满足焊接要求,这就需要在塑料中添加吸光的吸收剂,增大塑料的吸光系数。科学界对塑料激光焊接中吸收剂的使用也有深入研究, Haberstroh 等^[13]研究了材料中炭黑含量对焊缝形成的影响程度,得出随着炭黑含量的变化,熔透深度、焊缝宽度以及焊缝形貌的形成均有不同的结果。

(5) 控制软件。

塑料激光焊接控制软件的设计关乎焊接流程的自动化程度和产品的质量,国外许多塑料激光焊接设备制造企业如 Lesiter、Branson、Rofin 等都对控制软件进行了深入的研究,并将所研制的控制软件配套集成在生产中的焊接设备中,提高了产品的市场竞争力。2012 年, Vidal 等^[14]设计并开发了一套专用于激光透射焊的激光系统,获得了 0.7 ~ 1.4 mm 的高质量焊缝,揭示了激光控制软件在塑料焊接中的广阔应用前景。

(6) 微观焊接。

塑料激光微观焊接是指对精密微型器件进行焊接,随着塑料在电子器件、光学元件等微型器件领域的广泛应用,市场对塑料激光微焊接技术的需求逐年增加,不少科研机构也开始涉及微观焊接领域。2008 年,亚琛工业大学塑料加

工研究所的 Haberstroh 等^[15] 使用高功率二极管激光器的轮廓焊接来焊接金银丝和三维微结构。

(7) 激光器。

激光焊接首次出现在 20 世纪 70 年代,主要适用于焊接钢板和不锈钢^[16-17],由于激光源和方法的改进,直到 20 世纪 90 年代激光焊接技术才在多个应用中广泛使用。

第一台用于塑料焊接的激光器是 1970 年的 CO₂ 激光器^[18]。Casalino 等^[19] 利用 CO₂ 激光以对接方式对聚丙烯 (PP)、高密度聚乙烯 (PE-HD) 和低密度聚乙烯 (PE-LD) 进行激光焊接,以研究激光焊接期间热塑性聚合物的热形态和力学行为。

塑料激光焊接方面的一个重大突破是 20 世纪 90 年代开发的半导体激光源 (波长在 780 ~ 980 nm 之间),使激光在焊接塑料组件的工业应用中得到广泛应用^[16]。与其他激光器相比,半导体激光器产生辐射的效率要高得多,并且在波长方面有几种不同的选择 (例如 808, 915, 940, 980 nm),因此它非常适合焊接各种热塑性塑料^[20]。

塑料焊接的另一重大创新是 Nd : YAG 激光器 (波长 1 064 nm) 的开发^[16]。Pereira 等^[21] 首先使用 Nd : YAG 激光器对热塑性塑料进行焊接。由于脉冲之间存在冷却步骤,脉冲激光往往会阻碍焊接过程,导致在同一位置进行加热—冷却循环,从而导致损坏或缺陷。然而通过 Nd : YAG 激光器没有观察到这种焊接缺陷,这表明 Nd:YAG 激光器可用于热塑性塑料的焊接。

最近激光焊接的一个进步是引入了光纤激光器。光纤激光器的激光辐射 (波长在 1 000 ~ 2 100 nm 之间) 很容易被聚合物吸收,因此避免使用吸收剂^[22]。光纤激光器显示出更好的光束质量,被认为是 Nd:YAG 激光器的替代品,二者具有类似的光束质量,但光纤激光器效率更高^[23]。

2.2 国内理论研究

国内对塑料激光焊接技术的理论研究起步较晚,但最近几年随着实际工业生产对该技术的需要以及对焊接技术提出的更高的要求,国内理论研究成果呈上升趋势。

在塑料激光焊接工艺方面,蔡锦达等^[24] 采用 50 W 半导体激光器进行塑料焊接试验,寻找聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 最佳组合工艺参数范围,发现焊接速度为 20 mm/s、焊接功率为 10 W 和光斑直径为 1.6 mm 是一组优秀的工艺参数组合。张杰^[25] 利用半导体激光器对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (ABS) 进行激光透射焊接,分别研究了吸收剂、治具力、激光功率和焊接速度等工艺参数对焊接质量影响。结果表明:当激光功率为 40 W、焊接速度为 80 mm/s 时,焊缝拉伸强度达到最大值 56 MPa。方涛等^[26] 采用波长 1 700 nm 的半导体激光器作为加工热源进行试验,得到透明

全氟乙烯-丙烯共聚物的最优工艺条件,试验结果表面,影响焊接强度的首要因素为焊接速度,其次为激光功率,最后为离焦量。

在塑料激光焊接工艺参数方面,王传洋等^[27] 对 PP 塑料焊接工艺进行了深入分析,并通过试验和分析,优化参数以取得更好的焊接效果。章建胜等^[28] 对透明 PP 塑料激光焊接工艺参数进行试验得到一组最佳工艺参数,并进一步对焊缝截面进行切片分析,结果表明下层 PP 塑料吸收足够多的激光能量会有利于提高焊缝剪切强度。全源等^[29] 研究发现,激光功率密度对 ABS 塑料焊缝微观结构有直接影响,进而影响焊缝剪切强度。蔡令波等^[30] 设计焊接实验,通过分析确定了合适的焊接参数,验证了无吸收剂激光焊接 PC/PMMA 透明塑料的可行性。

针对两种透光材料之间激光焊接这一难点,龚飞等^[31] 采用炭黑、黑色聚丙烯颗粒、黑漆三种不同的吸收剂,对 PP 塑料的激光透射焊接工艺进行了研究,发现采用黑漆为吸收剂时能获得较美观的焊缝且焊接质量较好。王霄等^[32] 讨论了黑色薄膜和黑漆涂层两种吸收剂对激光辐射能量吸收的影响,发现黑漆涂层的焊接质量优于黑色薄膜。

在数值模拟方面,张惠中^[33] 采用正交实验和数值模拟相结合的方法,研究了各工艺参数对焊接强度和焊缝宽度的影响大小,分析结果发现对聚苯乙烯和聚氯乙烯之间焊接强度影响最大的为焊接速度,影响最小的为焊后保压时间。甄敬然等^[34] 针对塑料激光焊接的难以控制性,分析了热塑性塑料 ABS 和 PP 混合激光焊接的温度场分布,寻求最优焊接工艺参数。

在激光器方面,肖海霞等^[35] 分别采用光纤激光器和半导体激光器对 PP 塑料进行焊接工艺实验,分析两种激光器的光学差异,结果表明半导体激光器的功率更有利于提高焊接接头的拉力。

在吸收剂方面,Liu 等^[36] 提出了一种通过激光焊接在透明塑料之间获得优质接头的新方法,通过实验结果表明,在透明塑料的激光焊接中,染料吸收剂可以用金属替代。

在塑料激光焊接控制系统软件方面,刘江等^[37] 研究设计了温度反馈控制系统,进行试验研究发现此系统大大提高了塑料焊接过程的稳定性。李敏等^[38] 提出了基于软 PLC 平台的控制系统总体方案,并讨论了该控制系统软、硬件结构及其具体实现,使系统在离心风叶激光自动焊接机上可靠运行。

对比国内外理论和产业的研究现状可以发现,相比于国外,虽然国内理论和产业研究起步晚,但是国内研究的发展势头强劲,在不断地追赶,并且理论差距和产业差距在不断的缩小,这既归功于国内对于塑料激光焊接技术旺盛的需

求,也归功于国内科研工作者的艰苦努力,相信在不久的将来,国内塑料激光焊接技术一定可以达到世界一流的水平。

2.3 国外产业研究

在塑料激光焊接设备研发和实际运用方面,欧洲的 LPKF、Rofin 等公司由于在该领域更早地进行研究,理论方面也研究更深入,所推出的产品设备种类日益多样、功能更加强大。

德国 LPKF 公司研发出的 LPKF Power 3D 8000 专为大型塑料部件的系列生产而设计,这些塑料部件越来越多地应用于汽车行业:A、B、C 支柱、挡泥板、遮阳屋顶,特别是尾灯。该系统的一个独特特点是摆动焊接:在这种准同步方法中,附加的振幅叠加在正交于进给方向的激光束上。这使得焊缝的宽度在 1 mm~5 mm 之间很容易调整,有一个特别的 homo 温度分布,这将导致非常短的周期时间和简短的流程。8 个独立的伺服驱动夹紧,可以补偿焊接过程中的局部公差。该系统可焊接最大尺寸为 1000 mm × 750 mm × 400 mm (X/Y/Z) 的大型部件,并通过熔体行程监测来保障焊接质量。

欧洲较早研发塑料激光焊机系统的 Rofin 公司,推出了 MPS Compac、ExactWeld 230P、UW150RT、Diode Lasers 等多款用于塑料激光焊接的设备, MPS Compac 是一个多功能激光工作站,占有空间小,用于半自动焊接、结构化和钻孔,该设备由光线传输激光器系统集成,采用 CNC 控制器,可用于坐姿或站姿工作位置; ExactWeld 230P 是一台基于二极管激光的精确高分子焊接系统,用于塑料部件的高速、高质量、准同步焊接,该系统可实现中小型聚合物部件无颗粒和高产量焊接,它结合了二极管激光器、伺服控制钳位和响应软件,可提供高保真焊接质量和快速循环时间。

2.4 国内产业研究

在国内,虽然早期在塑料激光焊接领域理论上和设备上都落后于国外发达国家,但现今依旧有部分高科技公司致力于塑料激光焊接机等设备的研究和生产,且产品更新速度越来越快,理论研究也愈加成熟。

浙江久恒光电科技有限公司推出的双工位轨迹式塑料激光焊接机具备连续轨迹示教和远程控制功能,该设备主要由 100~200 W 光纤耦合输出的半导体激光器,专用激光焊接头,八轴运动控制软件,四轴机器人模组组成;采用符合国际标准全封闭激光防辐射和机、电、水、气一体化设计;可附加同轴温度控制系统,可靠识别焊线中的任何异常和焊接温度;采用双工位交替加工,显著提升生产效率。

大族激光^[39]针对透明塑料产品的洁净焊接需求,研发了新型透明塑料激光焊接系统,该系统采用特殊的透射焊接技术,采取多轴联动方式,焊接过程无需添加任何吸光添加剂,专门为透明塑料产品进行完美洁净的焊接。该系统采用模块化设计理念,集激光器、外光路运动焊接部件与具有特

殊功能的夹具为一体,结构紧凑、操作方便、安全稳定。

上海三束实业有限公司研发的测温闭环塑料激光焊接机采用德国进口测温模块,模块可设定相对温度实时显示闭环功率曲线图,高频采集焊接温度,实时自动控温调节激光器功率大小,更好保证了焊接后产品的安全性和依据性。系统软件可示教编程路径,也可直接导图加工;界面简单、灵活性强、功能强大、操作简捷,可灵活配合西门子等控制系统软件实现自动化链接。激光器采用进口 LD 光源,激光器做 PD 监测更好的保证产品在加工过程中的稳定性和安全性,实现激光部分闭环。实时显示功率曲线用于测温闭环实现互通。

3 塑料激光焊接的应用

塑料激光焊接技术除了在电子器件、产品包装、建筑工程等行业得到了广泛的应用外^[40-44],在以下几个方面也有重要的应用,而且是众多技术中最好的焊接技术。

(1) 三维焊接技术。在实际工业生产中,许多焊件是结构复杂的三维曲面,不仅要求焊件要具有很高的焊接质量,而且还需要保证焊件的美观。而普通的塑料焊接方法比如摩擦焊接、超声波焊接和热气焊接等一般仅能实现二维平面的焊接,并且焊件质量得不到保证,焊件外观也不美观。与此相比,激光焊接能借助机器人三维作业平台实现三维焊接技术,既能保证产品质量,又能使焊件美观。

(2) 生物医学微芯片的制造。随着科技的发展,塑料逐渐代替硅或玻璃材料在医学微芯片当中使用,这不仅大大降低了生产成本,而且提高了产品产量。但是,塑料芯片的生产技术限制了它的发展,而塑料激光焊接技术恰恰非常适合微型塑料的加工,为塑料医学微芯片的生产提供了新的技术方案。

(3) 微电子机械系统 (MEMS) 中微型机械的生产。微型机械的高精度、微小加工成了限制微型机械发展的关键因素,而塑料激光焊接技术凭借其微细加工优势得以胜任这项工作。

4 结语

塑料激光焊接技术在成本、速度、原材料适用范围、结合性和工艺性等方面弥补了常规塑料连接方法的不足。它是一种短流程、数字化、知识化、绿色环保、先进的新技术,正在成为激光焊接领域的一个热点;随着现代科学技术的进步和现代制造业的发展,中国塑料产品市场在国际的影响力大幅提高,同时新工艺、新设备的研发升级,将为激光焊接技术带来更广阔的前景。

参考文献

[1] 王健超. 激光塑料焊接系统控制软件的研究与实现 [D]. 上海:复旦大学,2008.

Wang Jianchao. Research and implementation of control software

- for laser plastic welding system[D]. Shanghai: Fudan University, 2008.
- [2] Bonten C, et al. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002, 21(8):699–709.
- [3] Wang Y Y, et al. Optics & Laser Technology, 2016, 80:153–161.
- [4] Brodhun J, et al. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L:Journal of Materials:Design and Applications, 2019, 233(3):475–484.
- [5] Schkutow A, et al. Procedia CIRP, 2020, 94:697–701.
- [6] Cosson B, et al. Optics & Laser Technology, 2019, 119. DOI: org/10.1016/j.optlastec.2019.105585.
- [7] Wilke L, et al. Welding in the World, 2008, 52(1):56–66.
- [8] Nguyen N P, et al. Welding in the World, 2020, 64(11):1 939–1 946.
- [9] Acherjee B. Welding in the World, 2021, 65(7):1 429–1 440.
- [10] Kagan V A, et al. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002, 21(12):1 101–1 122.
- [11] Rudrapati R, et al. Lasers in Engineering (Old City Publishing), 2019, 44(1-3):51–65.
- [12] Nguyen N P, et al. Welding in the World, 2020, 64(11):1 939–1 946.
- [13] Haberstroh E, et al. Microsystem Technologies, 2006, 12(7):632–639.
- [14] Vidal E R, et al. Optical Engineering, 2012, 51(12). DOI: org/10.1117/1.OE.51.12.124301.
- [15] Haberstroh E, Hoffmann W M. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008, 222(1):47–54.
- [16] Troughton M J. Handbook of plastics joining: A practical guide[M]. William Andrew, 2008.
- [17] Klein R. Laser welding of plastics: Materials, processes and industrial applications[M]. John Wiley & Sons, 2012.
- [18] Silvers Jr H J, Wachtell S. Perforating, welding and cutting plastic films with a continuous CO₂ laser'. PA State University, Eng[C]// Proc.1970:88–97.
- [19] Casalino G, et al. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 207(1-3): 63–71.
- [20] Moskvitin G V, et al. Welding International, 2013, 27(9):725–734.
- [21] Pereira A B, et al. Polymers, 2019, 11(9). DOI.org/10.3390/polym11091381.
- [22] Kagan V A, et al. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002, 21(12):1 101–1 122.
- [23] Frick T, et al. Procedia CIRP, 2018, 74:538–543.
- [24] 蔡锦达, 等. 电子科技, 2016, 29(10):140–143.
Cai Jinda, et al. Electronic Science and Technology, 2016, 29(10):140–143.
- [25] 张杰. 塑料科技, 2019, 47(12):75–78.
Zhang Jie, Plastics Science and Technology, 2019, 47(12):75–78.
- [26] 方涛, 等. 塑料科技, 2019, 47(11):79–81.
Fang Tao, et al. Plastics Science and Technology, 2019, 47(11):79–81.
- [27] 王传洋, 等. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2):183–188.
Wang Chuanyang, et al. Progress in Laser and Optoelectronics, 2015, 52(2):183–188.
- [28] 章建胜, 等. 塑料工业, 2022, 50(3):165–169.
Zhang Jiansheng, et al. China Plastics Industry, 2022, 50(3):165–169.
- [29] 仝源, 等. 应用激光, 2021, 41(1):131–135.
Tong Yuan, et al. Applied Laser, 2021, 41(1):131–135.
- [30] 蔡令波, 等. 工程塑料应用, 2022, 50(3):91–95.
Cai Lingbo, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3):91–95.
- [31] 龚飞, 等. 焊接学报, 2013, 34(4):109–112, 118.
Gong Fei, et al. Journal of Welding, 2013, 34(4):109–112, 118.
- [32] 王霄, 等. 应用激光, 2007(4):314–317.
Wang Xiao, et al. Applied Laser, 2007(4):314–317.
- [33] 张惠中. 热塑性塑料激光透射焊接的实验研究与数值模拟 [D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
Zhang Huizhong. Experimental research and numerical simulation of laser transmission welding of thermoplastics[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007.
- [34] 甄敬然, 等. 机械设计与制造, 2017(7):136–139.
Zhen Jingran, et al. Mechanical Design and Manufacturing, 2017(7):136–139.
- [35] 肖海霞, 等. 塑料工业, 2019, 47(8):69–71, 75.
Xiao Haixia, et al. China Plastic Industry, 2019, 47(8):69–71, 75.
- [36] Liu M, et al. Optics & Laser Technology, 2018, 105:242–248.
- [37] 刘江, 等. 塑料工业, 2017, 45(6):110–112, 129.
Liu Jiang, et al. China Plastic Industry, 2017, 45(6):110–112, 129.
- [38] 李敏, 等. 制造技术与机床, 2017(2):60–64.
Li Min, et al. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2017(2):60–64.
- [39] 佚名. 大族激光推出新型透明塑料激光焊接系统 [J]. 金属加工 (热加工), 2017(12):76.
- [40] 张玉坤. 合成材料老化与应用, 2019, 48(2):139–143.
Zhang Yukun. Synthetic Materials Aging and Technology, 2019, 48(2):139–143.
- [41] 高晓东, 等. 橡塑技术与装备, 2019, 45(8):26–32.
Gao Xiaodong, et al. Rubber and Plastic Technology and Equipment, 2019, 45(8):26–32.
- [42] 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.
- [43] 王振清, 等. 河南建材, 2018(2):41–42.
Wang Zhenqing, et al. Henan Building Materials, 2018(2):41–42.
- [44] 王燕, 等. 医疗装备, 2018, 31(5):196–199.
Wang Yan, et al. Medical Equipment, 2018, 31(5):196–199.