

激光焊接技术的发展与展望

王家淳

(北京有色金属研究总院, 北京, 100088)

摘要: 介绍激光焊接技术的发展历史, 阐明激光焊接的发展与应用现状及未来的发展前景, 论述激光焊接工艺的特点及需进一步研究与探讨的问题, 将激光焊接 (LBW) 与电子束焊接 (EBW)、惰性和活性气体保护电弧焊 (GTAW 和 GMAW) 及电阻焊 (RW) 工艺进行了全面的对比, 指出激光焊接工艺的优势所在及其存在的问题。

关键词: 激光焊接 CO₂ 激光器 Nd YAG 激光器 脉冲激光焊接 (PW) 连续激光焊接 (CW)

Development and expectation of laser welding technology

Wang Jiachun

(General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing, 100088)

Abstract: The developing procedure of laser welding technology is presented in this paper. The current situation of laser welding and future perspective is also clarified. The emphasis is focused on the characteristics of laser welding process and its problems to be studied. The comparisons of laser welding with other welding techniques, including electron beam welding, inert gas tungsten arc welding, gas metal arc welding and resistance welding, are performed roundly and deeply. The advantages and disadvantages of laser welding are summed up.

Key words: laser welding CO₂ laser Nd YAG laser pulsed laser welding continuous laser welding

引 言

激光焊接技术历经由脉冲波形向连续波形的发展, 由小功率薄板焊接向大功率厚件焊接发展, 由单工作台单工件加工向多工作台多工件同时焊接发展, 以及由简单焊缝形状向可控制的复杂焊缝形状发展, 受激物质也包含了多种气体和固体晶体。激光焊接的应用也随着激光焊接技术的发展而日趋广泛, 目前已涉及航空航天、武器制造、船舶制造、汽车制造、压力容器制造、民用及医用等多个领域。很多学者将激光加工连同电子束加工和等离子弧加工并称为 21 世纪最具发展前景及最有效的加工技术。作者在综合归纳的基础上, 对激光焊接技术的发展历史、应用现状、发展前景、优缺点及有待于解决的问题进行了全面系统的论述。

1 激光焊接技术的发展

随着激光这种新能源的获得, 材料加工的领域被大大拓宽, 激光焊接就是激光应用的重要方面之一。1962 年和 1963 年, 已经有关于激光焊接应用的报道。随后, 各国学者又做了许多激光焊接的基础性研究。70 年代以前, 由于高功率连续波 (CW) 激光器尚未开发出来, 所以, 研究重点集中在脉冲激光焊接 (PW)。早期的激光焊接研究试验大多数是利用红宝石脉冲激光器, 当时虽然能够获得较高的脉冲能量, 但这些激光器的平均输出功率却相当低, 这主要是

由激光器很低的工作效率和发光物质的受激性质所决定。Nd YAG 激光器由于具有较高的平均功率,在它出现之后很快就成为点焊和缝焊的优选设备。

Ready 在 1971 年曾指出^[1],激光焊接与电子束焊接的显著区别在于,激光辐射不能产生穿透(小孔)焊接方式,现在我们知道,这个结论是错误的,因为当激光束焦点的能量密度达到 10^6 W/cm^2 时,小孔的形成条件得到满足,从而就可以利用激光束进行穿透(深熔)焊接。同时,小孔的建立与维持需要一定的时间,因此,使用脉冲激光进行焊接时,小孔就不易向深处扩展,也就不易产生深熔焊。

随着千瓦级连续 CO_2 激光器焊接试验的成功^[2~7],激光焊接的研究与应用情况在 1971 年和 1972 年发生了变化。在大厚度不锈钢试件上进行 CO_2 激光焊接,形成了穿透熔深的焊缝,从而清楚地表明了小孔的形成,而且激光焊接产生的深熔焊缝(小孔效应焊缝)与电子束焊接相似^[6]。这些利用 CO_2 激光器进行金属焊接的早期工作证明了高功率连续激光焊接的巨大潜能。日本、德国、英国和前苏联等国的研究组也相继报道了高功率 CO_2 激光焊接技术的发展及其优化^[8~11]。 CO_2 激光焊接继续的发展集中于如何获得高光束质量的致密可靠的激光源,如何理解和解释接头设计、焊接速度、光束聚集和等离子效应之间的复杂相互作用及其与焊接性能的关系。除少数特例外,在这些研究中,基本不采用功率高于 20kW 的激光器进行焊接,事实上,激光焊接工艺开发与发展的后续经验表明,使用功率超过 12~15kW 的激光器进行焊接,并不会获得更多的益处,除非应用在焊接速度极高及金属工件厚度极大的场合。

由于金属的反射率在钕玻璃或 Nd YAG 激光 $1.06\mu\text{m}$ 波长下远远低于在 CO_2 激光 $10.6\mu\text{m}$ 波长的作用下,因此,相对于 CO_2 激光器来说,使用平均功率大大降低的 $1.06\mu\text{m}$ 波长的固体激光器(钕玻璃或 Nd YAG)进行焊接,可获得相当的焊接质量。光纤传导技术可以较好地应用于 $1.06\mu\text{m}$ 的激光,甚至功率高于 1kW 也是可行的,而 CO_2 激光则不具备这种性能。

CO_2 激光器的发展重点虽然仍集中于设备的开发研制,但已不在于提高最大的输出功率,而在于如何提高光束质量及其聚焦性能。与 CO_2 激光器的发展情况不同,Nd YAG 激光系统的发展趋势仍是如何提高平均功率,这个发展趋势受到高质量晶体生长的困难和激光技术的获得所限制,此外,Nd YAG 激光的导光与传输系统也有待于得到进一步的改善和优化。目前,已有学者报道了平均功率为 4kW 的 Nd YAG 激光焊接的试验数据^[12]。用于激发高功率 Nd YAG 晶体的二极管激光组合的应用是一项重要的发展课题,必将大大提高激光束的质量,并形成更加有效的激光加工。采用直接二极管阵列激发输出波长在近红外区域的激光,其平均功率已达 1kW,光电转换效率接近 50%。这些激光设备和技术总有一天会在焊接应用方面向 CO_2 激光器和 Nd YAG 激光器发起挑战。

2 激光焊接工艺技术概述

激光焊接工艺能够向工件传输高于 10 kW/mm^2 的能量密度,因此,能够形成深宽比较大的、小孔状的熔深。众所周知,激光焊接工艺有两大缺点和难题,即很高的成本投入和较低的能量转换效率,然而,激光焊接有许多优势所在,如热源的光路操纵容易,控制简单,工件的变形小,热影响区狭窄,精确性和自动化程度高,大多数情况下不需要真空工作室等等。激光焊接的这些优点足以弥补其不足。由于激光束能够获得相当高的能量密度,而且是一种清洁并可以方便控制的热源,所以,激光加工引起了生产和科研领域的广泛关注与浓厚兴趣^[13]。根据激光加工工作方式可分为连续波激光和脉冲波激光。在激光加工开发的早期,能够进行材

料熔化、切割与焊接的激光器多为脉冲输出的固态激光器(如钕玻璃和 Nd:YAG),连续波形激光器不具备材料加工所需的足够的输出功率。然而在近 20 年中,高功率连续波 CO₂ 气体激光器(波长为 10.6 μ m)和固体 Nd:YAG(掺钕-钇铝石榴石)激光器(波长为 1.06 μ m)的发展导致激光束作为热源的加工应用日趋增多和普遍,应用领域包括切割、焊接、热处理、软钎焊、硬钎焊、复层焊接及表面硬化等。目前,几乎所有用于焊接和热处理的固体 Nd:YAG 激光器都与光导纤维系统组合使用,具有革新性的纤维传送系统与 Nd:YAG 激光器的结合大大增加了激光加工系统的方便性与灵活性,这种组合系统对于工业上的多工作台同时加工及机器人或机械手操纵非常理想^[14]。而且 Nd:YAG 激光器比 CO₂ 激光器更适合于焊接高反射率材料(如铜合金和铝合金等),这是由于 Nd:YAG 激光具有相当短的波长(1.06 μ m),从而可获得较高的功率密度^[15,16]。值得注意的是,对于相同的平均功率,脉冲 Nd:YAG 激光比连续 Nd:YAG 激光可获得更大的熔深^[17]。

在航空工业以及许多其它应用中,激光焊接能够实现很多类型材料的连接,而且激光焊接通常具有许多其它传统熔焊工艺所无法比拟的优越性,尤其是激光焊接能够连接航空与汽车工业中比较难焊的薄板合金材料^[18],如铝合金与钛合金等,并且构件的变形小,接头质量高,重现性好。激光加工的另一项具有吸引力的应用方面是利用了激光能够实施局部微小范围加热的特性,激光所具有的这种特点使其非常适于印刷电路板一类的电子器件的焊接,激光能在电子器件上非常小的区域内产生很高的平均温度,而接头以外的区域则基本不受影响^[15,17,19]。

3 激光焊接工艺特点

在激光焊接过程中,当激光束触及金属材料时,其热量通过热传导传输到工件表面及表面以下更深处。在激光热源的作用下,材料熔化、蒸发,并穿透工件的厚度方向形成狭长空洞,随着激光焊接的进行,小孔沿两工件间的接缝移动,进而形成焊缝。激光焊接(LBW)的显著特征是大熔深、窄焊道、小热影响区,以及高功率密度^[20]。

激光焊接代表着一种在微小区域内加热与冷却之间的精细平衡。激光焊接的目的是通过辐射吸收产生液态熔池,并使之长到理想尺寸,然后沿固体界面移动,消除被焊构件间的初始缝隙,形成高质量焊缝。熔池过大、过小,或者蒸发严重,都将导致焊接失败。此外,焊缝的最终质量还可能因其它因素的改变而恶化,如合金成分的蒸发,过大的热梯度(导致热裂纹),以及焊接熔池体积与几何形状的不稳定(导致气孔和空穴)等。

热输入与输出之间平衡的维护取决于激光的稳定吸收及能量在工件内部的均匀传递。激光向工件传递的途径经常被激光焦点处产生的蒸气所干扰,在一定条件下,这种蒸气可以转化为等离子体,从而由于吸收和溅射而使激光强度减弱。在焊接熔池存在时,熔合区与周围基体材料间界面几何形状的稳定,是决定工件内部稳定传热的主要因素,在焊接过程中工件移动或激光束移动的时候,固液界面经常受到干扰,因此,在焊接熔池的冷却速度中必须引入附加的几何形状影响因素。

既然存在这么多潜在的限制因素,很难想象激光焊接会获得高质量的焊缝。但是,不管激光焊接中激发与冷却平衡过程存在多少限制,大量的传热与机械时间常数仍能共同作用,以适应激光焊接的要求,并将各种波动减轻到一定程度,进而建立稳定的焊接条件。激光焊接研究的首要目标就是辨析影响激光焊接稳定性和重现性的参数,并寻求控制这些参数的方法。这

首先应从激光源本身出发,因为输出功率与模式的波动在焊接熔池中转换成热波动,从而导致激光焊接过程不稳定性的产生。激光与材料相互作用过程的高度非线性特征意味着某些波动在幅度上的快速增加,这同时也提供了控制激光焊接过程的可能性与现实性,即利用各种传感器检测声、光、电的波动信号,并进行有效的处理,进而有选择地改变激光的输出方式。

如果与激光焊接系统激发、响应有关的众多参数可以精确控制,则激光焊接的精密密度是完全可以保证的。在整个焊接过程中,工件响应的波动是一个主导因素,与这些因素相关的频谱带宽对于等离子波动最小为 10MHz,而对于机械运动,特别是与液体振动有关的运动,带宽较小(10kHz),因此,检测激光焊接产生的声光发射信号是监控焊接条件的重要方式,识别这些信号的组成,诊断特定的错误条件,为优化焊接工艺、消除焊接接头的缺陷并实时控制焊接过程提供了可能。为了对各种数据和加工速率提出更加严格的要求,应该记录并分析这些声光信号,并将其转换为控制信号,送回反馈回路,以驱动机电装置,调整激光焊接系统,补偿焊缝及接头的缺陷。

激光焊接有两种基本方式:传导焊与深熔(小孔)焊。这两种方式最根本的区别在于:前者熔池表面保持封闭,而后者熔池则被激光束穿透成孔。传导焊对系统的扰动较小,因为激光束的辐射没有穿透被焊材料,所以,在传导焊过程中焊缝不易被气体侵入;而深熔焊时,小孔的不断关闭能导致气孔。传导焊和深熔焊方式也可以在同一焊接过程中相互转换,由传导方式向小孔方式的转变取决于施加于工件的峰值激光能量密度和激光脉冲持续时间。激光脉冲能量密度的时间依赖性能够使激光焊接在激光与材料相互作用期间由一种焊接方式向另一种方式转变,即在相互作用过程中焊缝可以先在传导方式下形成,然后再转变为小孔方式。可以调节激光焊接过程中各因素相互作用的程度,使得小孔建立以后能够在脉冲间歇阶段收缩,从而减小气体侵入的可能性,降低气孔产生的倾向;还可以调整激光功率密度随时间的分布,以减小熔池的热梯度,降低焊接接头凝固裂纹产生的倾向。

激光焊接的主要优势之一就是能够通过调节激光与材料的相互作用来优化焊接接头的综合性能,在当代先进的激光焊接系统中,这种优化主要通过激光功率的计算机控制来实现。通过由光、声或等离子监测系统发回的反馈,可以实时变化激光功率以适应焊接条件的改变。在激光焊接工艺逐渐被人们接受和采纳以后,这种闭环控制系统能保证在工业生产条件下,优化焊接过程,而无需操作者干预。

4 激光焊接与其它焊接工艺的对比

激光焊接与其它传统焊接工艺相比,有着许多优点。其最主要的优势之一就是能够将激光束集中于非常狭小的区域,从而产生高能量密度的热源,随后,该集中热源快速扫过被焊接缝,在这方面,激光焊接可与电子束焊接相比拟,但激光焊接却有着优于电子束焊接的特点,即激光焊接可在大气压下进行,而无需真空室。通过视窗、透镜及光纤,可以实现远程位置与多工作台的激光焊接,而且,激光焊接还可以在焊条和电子束无法达到的三维构件内部细微区域中实施。与电子束焊接类似,激光焊接可以实现单面焊接双面成形,复层结构也可采取单面激光焊接,所以,对于那些用其它方法需从双面焊接的接头,如果采用激光焊接工艺,则可从单面施焊。这种灵活性开辟了接头设计的许多新思想,特别是针对某些包含不可接触表面的构件^[19]。

尽管激光焊接系统的成本通常高于传统的焊接设备,但其高生产率及焊缝质量足以弥补

此项缺憾,并使得激光焊接系统在技术经济上具有很强的综合竞争能力。对于毫米级厚度的板材结构,在 CNC 控制下,当焊接速度超过 10m/ min 时,可获得高质量、均匀的激光焊缝,而且还可对焊缝质量进行全面的监测。与电弧焊接技术相比,激光焊接接头具有相当狭窄的热影响区,从而限制了热变形,提高了焊缝的综合冶金性能。激光焊接的窄热影响区及其大熔深增强了接头的机械性能(包括疲劳强度和成形性能等)。对于难焊材料(如铅、镁合金等)的连接,激光焊接也能提供新的可能性,而且在大多数情况下不需填充材料。激光焊接消除了焊条及电极材料产生的污染,并有效降低有益合金元素(如锌、铅、钒等)的损耗。对于一些传统技术很难或无法焊接的合金系列,采用激光焊接可使过程稳定,焊缝强度提高并具有优异的成形。

激光焊接也存在不足,包括激光器及用于激光束传导和聚集的附属系统成本过高,操作成本也很高,特别是需要大量昂贵保护气体(如氦等)的应用场合。激光束的紧密聚集、热量向工件的有效传递以及狭小的热影响区等优点,也带来了接头装配的难题,很小的组装偏差就会导致焊接条件较大的变化,甚至很窄的间隙(0.1mm)也能引起激光辐射耦合的缺陷和热效率的降低。高反射率材料(如铝、铜等)的激光焊接,如要减少反射,则需要仔细优化激光辐射的条件,必要时还需采用涂层材料。同时,这些金属的热导率较大,在焊接启动时应使用较高的激光能量密度,这有时会导致激光反射回激光器,从而引起光学元件的损坏。构件在焊接过程中的装配偏差也可能引起激光束具有危险性的反射。

表 1 激光焊接与其它焊接工艺的对比

对比项目	激光焊接	电子束焊接	钨极惰性气体保护电弧焊	熔化极气体保护焊	电阻焊
焊接效率	0	0	-	-	+
大深宽比	+	+	-	-	-
小热影响区	+	+	-	-	0
高焊接速率	+	+	-	+	-
焊缝断面形貌	+	+	0	0	0
大气压下施焊	+	-	+	+	+
焊接高反射率材料	-	+	+	+	+
使用填充材料	0	-	+	+	-
自动加工	+	-	+	0	+
成 本	-	-	+	+	+
操作成本	0	0	+	+	+
可 靠 性	+	-	+	+	+
组 装	+	-	-	-	-

注:“+”表示优势;“-”表示劣势;“0”表示适中。

激光焊接与其它主要焊接方法优缺点的对比总结于表 1。与其它焊接工艺相比,激光焊接的主要优势在于,焦点能量密度超过传统方法几个数量级(参见表 2),这就引出了小孔或深熔焊的概念。同时,激光焊接具有很大的深宽比,很小的热影响区和较高的加工速度。

表 2 不同焊接工艺技术焊缝表面输入功率密度范围与焊缝深宽比的对比

焊接工艺	功率密度(W cm ⁻²)	焊缝深宽比
激光焊接	10 ⁶ ~10 ⁷	高
电子束焊接	10 ⁶ ~10 ⁷	高
钨极氩弧焊	10 ² ~10 ⁴	小或中等
熔化极气体保护焊	10 ² ~10 ⁴	小或中等
电 阻 焊	—	小

5 激光焊接技术的发展前景与面临的挑战

目前,在激光焊接技术研究与应用方面处于世界领先水平的国家有德国、日本、瑞士和美国等国。横流连续 CO₂ 激光加工设备的输出功率可达 20kW,脉冲 Nd YAG 激光器的最大平均输出功率也已达到 4kW,并且实现了纳秒级的脉冲宽度。激光焊接能够实现的材料厚度最大已达 80mm,最小为 0.05mm,大部分材料的激光焊接质量均超过传统焊接工艺。激光焊接技术正朝着低成本、高质量的方向发展,具有很大的发展潜力和发展前景。可以预料,激光焊接工艺将逐步占据焊接领域的主要位置,并取代一些传统落后的焊接方法。

激光焊接技术在迅猛发展的同时,也面临着一些新的课题,其中包括:高功率低模式激光器的开发及在焊接中的应用;纳秒级短脉冲高峰值功率激光焊接过程中激光与材料的作用机制;超薄板材激光焊接工艺的优化与接头性能的检测;激光焊接时声、光、电信号的反馈控制;激光焊接过程中等离子体的产生对焊接质量的影响等等。激光焊接技术面临的这些新的挑战,有待于从事激光焊接的研究人员进行深入的探讨,同时,这些新问题的提出也预示着激光焊接技术正向着更加深化的方向发展。

6 结束语

激光焊接技术的发展历经了从固体受激物质 气体受激物质 固体受激物质、由脉冲激光焊接 连续激光焊接、低功率 高功率、薄板 厚件、低速 高速、低频 高频及低效 高效的历史。激光焊接工艺具有许多独特的优势,如聚集的能量密度相当高、焊缝狭窄、热影响区小、操作简单、控制容易,不需要真空室等,可以利用其深熔方式来焊接厚大工件,也可以通过热导方式焊接薄板。激光焊接的优异性能使其能够方便地应用于许多领域,并日益受到人们的关注。但是,激光焊接仍有一些不足之处,包括较高的制造与操作成本和较低的能量转换效率,此外,CO₂ 激光器不太适合焊接高反射率材料(如铜、铝等),对有害气体(如氢、氧、氮等)具有强烈吸收作用的材料(如钛合金)激光焊接时惰性气体保护工艺仍有难题,激光光纤传输的较低效率限制了多工作台多工件同时焊接的进一步发展与推广,激光焊接的熔深控制及超薄板(0.25mm)的激光焊接工艺仍不成熟,所有这些问题均有待于深入的研究与实践。

激光焊接技术发展到今天,其逐步取代电弧焊、电阻焊等传统焊接方法的趋势已不可逆转,在未来的 21 世纪中,激光焊接技术在材料连接领域必将起到至关重要的作用。

参 考 文 献

- 1 Ready J F. Effects of high power laser radiation. New York: Academic Press, 1971
- 2 Banas C M. UARL Report 125(1971, 6), IEEE Symp. Electron Ion and Laser Beam Technology 11th, San Francisco: San Francisco Press, 1971
- 3 Locke E V, Hoag E D, Hella R A. Weld J, 1972;51: 245
- 4 Locke E V, Hoag E D, Hella R A. IEEE J Q E, 1972;QE8:132
- 5 Baardsen E L, Schmatz D J, Bisaro R E. Weld J, 1973;52: 227
- 6 Locke E V, Hella R A. IEEE J Q E, 1974;QE10:179
- 7 Ball W C, Banas C M. Welding with a high power CO₂ laser. Nat Aerosp Eng and Mfr. Meeting, San Diego, California, 1974
- 8 Arata Y. Proc LAMP, 1987: 3
- 9 Ruffler C, Güts K. Opt & Laser Technol, 1972;4: 265
- 10 Swift-Hook D T, Gick A E F. Weld J, 1973;52: 492

同轴射频激励 CO₂ 激光器的热效应研究

王又青 陈清明 李再光

(华中科技大学激光技术国家重点实验室,武汉,430074)

摘要: 通过求解放电等离子体中的带电粒子密度和能量的平衡方程、电流连续性方程以及热传导方程,研究了同轴射频(RF)激励 CO₂ 激光器中放电混合气体的温度效应,分析了有关放电参数对温度分布的影响。

关键词: 同轴 RF 激励 CO₂ 激光器 热效应

Study on thermal effect of a coaxial RF-excited CO₂ laser

Wang Youqing, Chen Qingming, Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: This paper describes the thermal effects of a coaxial RF-excited CO₂ laser, based on the balance equations of electron density and energy, current continuity equation, and heat conduction equation. Dependencies of the spatial distributions of gas temperature on some discharge parameters are discussed.

Key words: coaxial RF-excite CO₂ laser thermal effect

引 言

目前,RF 横向激励 CO₂ 激光器逐渐成为一种较有发展潜力的新一代大功率 CO₂ 激光器,其最显著的优点就是遵循面积放大规律,即可依靠增加放电面积的方法来提高放电注入功率和激光输出功率,而扩散冷却技术在这里的成功应用使得这一优点得以充分体现,因此,不再像传统的封离式激光器那样,需要靠增加放电长度来提高输出功率,从而大大缩小了激光器的

- 11 Rykalin N N, Uglov A, Kokora A. Laser machining and welding, Moscow: MIR, 1978
- 12 Nishimi A, Kanazawa H, Taniu Y *et al.* Proc ICAL EO '96, E11, 1996
- 13 Johnson K I. Current and future developments of the plasma arc, laser and electron beam processing. Proc Int Power Beam Conf, San Diego, California, USA, 1998; 5(2~4): 1~10
- 14 Kugler R, Weedon T. Laser Technology and Applications: Vulkan-Verlag Essen, 1993: 47
- 15 Mazumder J. Laser welding: State of the art review. JOM, 1982; (7): 16~24
- 16 Eberle H G, Kumkar M, Pathe D *et al.* Nd: YAG laser beam welding with a 1.5kW Q-Switch-Laser. Proc of ECLAT '94, 5th European Conference on Laser Treatment of Materials, DVS, 1994: 94~100
- 17 Mazumder J. Laser beam welding. ASM Handbook, ASM International, 1993; 12: 262~269
- 18 Ripple P. Laser beam welding with robots in the automotive industry. Proc ECLAT '94, 5th European Conference on Laser Treatment of Materials, DVS, 1994: 151~164
- 19 Kujanpaa V P, David S A. Proc ICAL EO '86, 1986: 63
- 20 Cam G. Welding in the World, 1999; 43(2): 13~26

作者简介:王家淳,男,1972 年出生。工程师,博士研究生。现主要从事钛合金激光焊接的研究。

收稿日期:2000-01-04 收到修改稿日期:2000-03-02