

文章编号: 1001-3806(2003)05-0486-04

试析几种激光复合焊接技术

刘继常^{1,2} 李力钧¹ 朱小东¹ 陈洪¹⁽¹⁾湖南大学激光研究所,长沙,410082) ⁽²⁾株洲工学院,株洲,412008)

摘要:介绍了激光与其它热源进行复合焊接的几种方法,分析了这些复合焊接方法在保持激光焊接优点的基础上克服激光焊接缺陷的机理,最后指出这些复合焊接方法是激光焊接的一个发展趋势。

关键词:激光;复合焊接;机理;发展趋势

中图分类号: TG439.4 **文献标识码:** A

Discussion on laser welding combined with other heat resources

Liu Jichang^{1,2}, Li Lijun¹, Zhu Xiaodong¹, Chen Hong¹⁽¹⁾ Laser Institute, Hunan University, Changsha, 410082)⁽²⁾ Zhuzhou Institute of Technology, Zhuzhou, 412008)

Abstract: This paper introduces several methods of laser welding combined with other heat resources, and investigates why they decrease or eliminate the drawbacks of laser welding while embodying its advantages. We can draw a conclusion that laser welding combined with other heat resources is a trend of laser welding development.

Key words: laser; welding combined with other heat resources; mechanisms; trend of development

引言

激光焊接是先进制造技术之一,属于深熔焊接,有不少优点:高的加工速度,可以即起即停;室温操作;能对钛、石英等材料直接焊接;无需精密工具、电极或填充材料;在操作过程中无污染;热影响区窄;容易实现自动化,能自动焊接复杂形状;无需后续工序;焊缝小,焊缝强度达到或超过母材强度,等等。正是因为激光焊接具有很多优点,它在制造行业得到了越来越广泛的应用。但是,激光焊接也有一些不足之处,例如,能量转换和利用率低,尤其对高反射率、高导热系数的材料焊接困难;对母材焊接端面接口要求高,容易产生错位和焊接不连续;容易生成气孔和疏松,产生裂纹;焊缝存在凹陷;焊接过程不稳定,等等^[1-4]。人们为了消除或减少激光焊接的缺陷,更好地应用这一优秀的焊接方法,提出了一些用其它热源与激光进行复合焊接的工艺,主要有激光与电弧、激光与等离子弧、激光与感应热源复合焊接以及双激光束焊接等^[1,5,6]。

1 激光与电弧复合焊接

这种复合焊接主要指激光与 TIG 或 MIG 电弧复合焊接。在这种工艺中,激光和电弧相互作用、取长补短。例如,激光焊接的能量利用率低的重要原因是在焊接过程中产生的等离子体云对激光的吸收和散射,且等离子体对激光的吸收与正负离子密度的乘积成正比;如果在激光束附近外加电弧,电子密度显著降低,等离子体云得到稀释,对激光的消耗减小,工件对激光的吸收率提高。而且由于工件对激光的吸收率随温度的升高而增大,电弧对焊接母材接口进行预热,使接口开始被激光照射时的温度升高,也使激光的吸收率进一步提高^[7]。所以,激光能量利用率提高。同时,激光束对电弧有聚焦、引导作用,电弧的稳定性和效率提高。这样,焊接熔深进一步增加。这种效果尤其对于激光反射率高、导热系数高的材料更加显著^[8]。

在激光焊接时,由于热作用和影响区很小,焊接端面接口容易发生错位和焊接不连续现象;峰值温度高,温度梯度大,焊接后冷却、凝固很快,容易产生裂纹和气孔。而在激光与电弧复合焊接时,由于电弧的热作用范围、热影响区较大,可缓和对接口精度的要求,减少错位和焊接不连续现象;而且温度梯度

作者简介:刘继常,男,1968年8月出生。博士研究生。现从事激光加工、快速原型及金属材料等方面的研究。
收稿日期:2002-04-01;收到修改稿日期:2003-04-16

较小,冷却、凝固过程较缓慢,有利于气体的排除,降低内应力,减少或消除气孔和裂纹^[2]。

由于电弧焊接容易使用添加剂,可以填充间隙,采用激光-电弧复合焊接的方法能减少或消除焊缝的凹陷^[2]。

激光与 TIG 复合焊接的特点是:(1)利用电弧增强激光的作用,可用小功率激光器代替大功率激光器焊接金属材料;(2)可高速焊接薄件;(3)可改善焊缝成型,获得优质焊接接头^[5];(4)可缓和母材焊接端面接口精度要求。例如,当 CO₂ 激光功率为 0.8kW, TIG 电弧的电流为 90A,焊接速度 2m/min 时,可与 5kW 的 CO₂ 激光焊机的焊接能力相当;5kW 的 CO₂ 激光束与 300A 的 TIG 电弧复合,焊接速度 (0.5~5) m/min 时,获得的熔深是单独使用 5kW 的 CO₂ 激光束焊接时的 (1.3~1.6) 倍^[5]。

激光与 MIG 复合焊接的特点是:(1)与激光-TIG 电弧复合焊接相似,电弧增强激光的作用,提高焊接速度,可用小功率激光器代替大功率激光器进行焊接,改善焊接质量,缓和母材端面接口精度要求;(2)能够添加合金元素调整焊缝金属成分,并可消除焊缝凹陷^[2]。日本四国工业技术研究所用 5kW CO₂ 激光束与 400A 的 MIG 电弧复合,焊接速度为 800mm/min 时,可焊透 12mm 厚的钢板^[4]。日本东芝公司用 6kW 的 CO₂ 激光与 7.5kW 的 MIG 电弧复合,在选择合适的电弧电流、保护气体等参数时,以 700mm/min 的速度,可以焊透 16mm 厚的不锈钢板,焊缝的放射线检查结果可达 RT1 级 (JIS Z3106)^[2]。文献[8]中报道了在比较宽的参数范围内,用 YAG 激光脉冲 MIG 复合焊接铝合金,焊缝成型美观,无气孔等缺陷,熔深比激光焊增加 4 倍,比脉冲 MIG 焊接增加 1 倍以上,焊速显著提高。

日本三菱重工研制出了 YAG 激光与电弧同轴复合焊接系统,其原理如图 1 所示,同轴焊接工作头如图 2 所示^[9]。

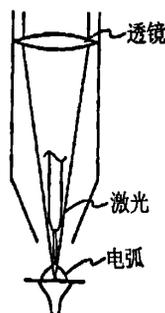


图 1 同轴 TIG/MIG-YAG 焊接示意图

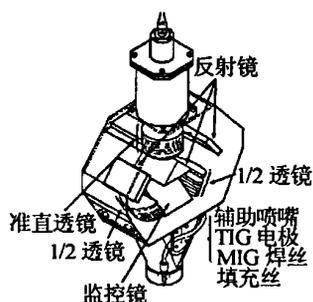


图 2 同轴焊接工作头

2 激光与等离子体复合焊接

此方法的原理与激光-电弧复合焊接有一些相似,像电弧一样,等离子弧的热作用区也较大;等离子弧的预热也使工件被激光初始照射时的温度升高,提高激光的吸收率;等离子弧也提供大量的能量,使总的单位面积热输入增加;激光也对等离子弧有稳定、导向和聚焦的作用,使等离子弧向激光的热作用区集聚。但在激光-电弧复合焊接时,电弧稀释光致等离子体云的效果随着电弧电流的增大而削弱,而激光-等离子弧复合焊接时的等离子体是热源,它吸收激光光子能量并向工件传递,反而使激光能量利用率提高。另外,在激光-电弧复合焊接中,由于反复采用高频引弧,起弧过程中电弧的稳定性相对较差;电弧的方向性和刚性也不理想;同时,钨极端头处于高温金属蒸气中,容易被污染,从而影响电弧的稳定性。而在激光与等离子弧复合焊接过程中,只有起弧时才需要高频高压电流,等离子弧稳定,电极不暴露在金属蒸气中,所以这种工艺可以解决激光-电弧复合焊接的以上问题^[5,6,10]。

在激光-等离子体复合焊接装置中,激光束与等离子弧可以同轴,也可以不同轴,但等离子弧一般指向工件表面激光光斑位置^[10,11]。与激光-电弧复合焊接一样,这种工艺除对一般材料焊接外,也能够焊接高反射率、高导热系数的材料。

英国考文垂大学先进连接中心采用功率为 400W 的激光器和电流为 60A 的等离子弧,焊接了碳钢、不锈钢、铝合金和钛合金等金属材料,均获得了良好结果。对薄板焊接时,在相同的熔深条件下,激光与等离子弧复合焊接的速度是仅采用激光焊接的 (2~3) 倍,而且允许对接母材端面间隙可达材料厚度的 25%~30%、对接错位可达材料厚度的 80% 而保持良好的接缝熔合^[5,6,10]。

文献[12]中研究了用激光分别与 MIG 电弧和等离子弧复合焊接 Al 合金的特点。导热系数高、厚 1.3mm 的 AlMgSi 合金板 (6000 系列) 用激光和等离子弧复合焊接,可获得 4m/min 的焊接速度 (甚至可更高,但焊缝质量随之降低),得到的焊接接头静载强度仅稍低于激光焊。与 MIG 焊相比,等离子弧中所具有的更高的能量密度可以使激光和等离子弧复合焊接法在焊接厚板时获得较高的焊接速度。因此,该文献认为,在这两种复合焊接法中,激光和等离子弧复合焊接法是比较有前途的。

3 激光与感应热源复合焊接

在这种复合焊接工艺中,用高频感应热源对工件进行预热,在工件达到一定温度后,再用激光对工件进行焊接。这种工艺要求工件材料能被感应热源加热,而加热工件的感应圈对工件形状有所限制,比较适合的是管状或棒状工件的焊接。

在工件不经预热、直接用激光焊接时,热影响区很高的温度梯度导致焊接后过快的冷却速度,气体不易排除而形成气孔,内应力大而使薄的工件容易变形,钢的微观组织中沿着原来的奥氏体晶界出现魏氏体等有害组织,近表面处产生穿过马氏体晶粒的深裂纹。感应热源对工件预热后,由于工件焊接部位周围较大区域初始温度较高,焊接时热影响区的温度梯度相对不预热的工件小,焊接后工件冷却速度较低,凝固和随后的固态冷却转变过程变得缓慢,可以改善焊接后的微观组织,提高焊缝强度,消除裂纹。而较慢的冷却、凝固过程有利于气体的排除和产生较小的内应力,故感应热源对工件预热可以减少或消除气孔,防止薄壁工件变形^[3]。

另外,高频感应预热因提高工件初始温度而提高工件对激光的吸收率,使激光能量利用率提高,焊接速度加大^[3]。Ono等在研究高频感应预热对碳钢板的激光焊接的作用时发现,焊接速度与预热温度之间存在如下关系^[13]:

$$v_p/v_r = (T_m - T_r)/(T_m - T_p) \quad (1)$$

式中, v_p 、 v_r 分别是经预热的碳钢板激光焊接速度和不经预热的碳钢板激光焊接速度, T_m 、 T_p 、 T_r 分别是钢板熔点、预热温度和室温。

文献[3]中对曲轴进行激光感应加热复合焊接,一个便携式空气冷却的25kW,(10~25)kHz的感应电源安装在激光焊接头附近并提供所需的能量,而且它的加热控制在一个精细的区域内,对相邻区域几乎没有影响。焊接后对焊接区域的断面微观组织进行研究,没有出现魏氏体组织,十分接近中碳钢的正火组织;在3个月内没有发现裂纹;剪切强度稳定地提高了17%~20%。

文献[13]中介绍了25kW的CO₂激光焊接24in管子的设备,采用了高频感应预热母材焊接端面附近的方法。研究发现,用25kW的CO₂激光焊接10mm厚的碳钢板,经高频感应预热到800℃的焊接速度是不经预热的2倍左右;焊接厚度15mm以上的碳钢板,不经预热的激光焊接速度与埋弧焊接相当,而经预热的15mm厚碳钢板的激光焊接速

度是埋弧焊接速度的3倍,而且随着板厚减小,这两种焊接速度的相对倍数增大。

日本住友金属兴业(株)钢铁技术研究所将高频感应与激光复合焊接方法应用于不锈钢管制作中,见图3,用高频电源预热钢管,用激光进行焊接。在焊接直径为34mm,厚度为3mm的SUS304不锈钢管时,高频感应圈将钢管预热到554℃,焊接速度可达到无预热激光焊接的3倍,且接头质量良好^[5]。

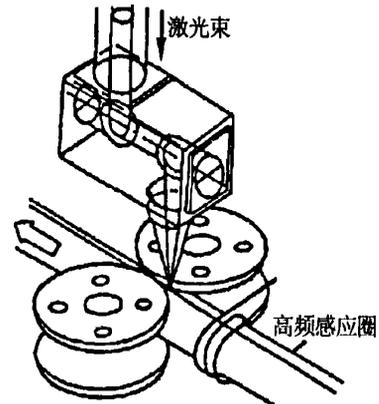


图3 高频感应-激光复合焊接

4 双激光束焊接

在激光焊接过程中,由于激光功率密度大,焊接母材被迅速加热熔化、汽化,生成高温金属蒸气。在高功率密度的激光的继续作用下,极易生成等离子体云,不仅减小工件对激光的吸收,而且使焊接过程不稳定。若在较大的深熔小孔形成后,减小继续照射的激光功率密度,而已经形成的较大的深熔小孔对激光的吸收较多,结果激光对金属蒸气的作用减少,等离子体云就能减小或消失。因而,用一束峰值功率较高的脉冲激光和一束连续激光,或者两束脉冲宽度、重复频率和峰值功率有较大差异的脉冲激光对工件进行复合焊接,在焊接过程中,两束激光共同照射工件,周期地形成较大深熔小孔后,适时地停止一束激光的照射,可以使等离子体云变得很小或消失,其对激光的吸收和散射减小,工件对激光能量的吸收率提高,以加大焊接熔深,提高焊接能力^[14]。

Narikiyo等实验研究了用两束钕-钇铝石榴石激光对10mm厚的304不锈钢板进行复合焊接^[14],其中一束为峰值功率较高的脉冲激光,另一束为调制矩形波的连续激光,如图4所示。在总的平均功率为2.9kW和焊接速度为5mm/s,选择最佳脉冲能量密度时,获得的最大熔深为7.3mm。相比之下,当采用平均功率为2kW的调制矩形波连续激光和功率为1kW的连续激光相配合时,总的平均功率

也为 2.9kW,得到的最大熔深超过 5mm。观察发现,在形成较大深熔小孔后,停止高峰值功率的脉冲光束的照射,在连续激光束继续作用的过程中,激光火焰熄灭;最大熔深和激光火焰熄灭时间之间存在着严格的关系。这种现象说明,较高峰值功率的脉冲激光和连续激光复合焊接时,在形成较大深熔小孔后,较高峰值功率的脉冲激光停止照射,功率密度减小,等离子体云可以消失。因此,较高峰值功率的脉冲激光的辅助作用能够加大焊接熔深,提高焊接能力和激光能量利用率,同时改善焊接的稳定性。

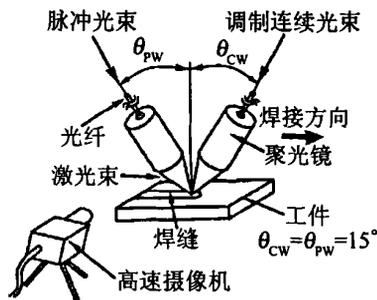


图 4 双激光束焊接

5 结 论

(1) 单独用激光做能源焊接时,热作用和影响区窄,无电极污染,但能量利用率较低,适宜于薄板精密焊接,对导热系数高、对激光反射率高的金属材料焊接困难,而且焊接接口处易发生错位,易生成气孔和疏松,产生变形和裂纹,因而不少场合采用激光与其它热源复合焊接的方法来克服这些缺点。

(2) 激光-电弧复合焊接的热作用和影响区较宽,不易形成气孔、疏松、变形和裂纹,因电弧与激光的相互作用,能量利用率较高,焊接能力提高,可以焊接较厚的金属材料,也适宜于导热系数高、对激光反射率高的金属材料,对接口精度的要求也不高,并可添加合金元素,调整焊缝成分、消除焊缝凹陷,但存在电极污染。

(3) 激光-等离子弧复合焊接与激光-电弧复合焊接一样,其热作用和影响区较宽,不易形成气孔、疏松、变形和裂纹,而等离子弧与激光的相互作用使

能量利用率提高,焊接能力相对更高,可以焊接较厚的金属材料,同样也适宜于导热系数高、对激光反射率高的金属材料,对接口精度的要求也不高,不存在电极污染,焊接过程也比较稳定。

(4) 激光-高频感应热源复合焊接因高频感应预热,热影响区温度梯度较低,激光被工件吸收利用的比率增高,可改善焊接后的微观组织,提高焊缝强度,消除裂纹、气孔、变形,提高焊接速度,但需要专用装置,适于管类工件,且工件必须能被电磁感应。

(5) 双激光束焊接因为激光功率密度周期地改变,吸收和散射激光能量的等离子体云不能维持,激光能量利用率提高,焊接熔深加大,可以焊接较厚的材料,但要求两束激光的频率和峰值功率适当匹配。

(6) 各种复合焊接方法各自综合发挥激光和其它热源的长处,改变热源功率密度在时间和空间上的分布,能在不同方面、不同程度上减少或消除单独激光焊接的缺陷,提高激光能量利用率和焊接能力,是激光焊接的一个发展趋势。

参 考 文 献

- [1] 阿部信行,林雅一. 溶接学会志,2001,70(4):7~11.
- [2] 牧野吉延,椎原克典,浅井知. 溶接学会志,2001,70(4):18~22.
- [3] Khersonsky A, Lee H. *Advanced Materials & Process*, 2000(4): 39~41.
- [4] 王家淳. 激光技术,2001,25(1):48~53.
- [5] 陈 健. 焊接,1994(4):2~6.
- [6] 冯曰梅,周方明,蒋成禹. 焊接,2002(1):5~9.
- [7] 胡绳荪,张绍彬,赵家瑞. 焊接学报,1993,14(3):159~163.
- [8] 樊 丁,中田一博,牛尾诚夫. 应用激光,2002,22(2):169~171.
- [9] 石出孝,名山理介,渡边真生 *et al.* 溶接学会志,2001,70(4): 12~17.
- [10] Walduck R P, Biffin J. *Welding & Metal Fabrication*, 1994, 62(4):172~176.
- [11] Al-Shamma 'a A I, Wylie S R, Lucas J *et al.* *J Materials Processing Technology*, 2002, 121(1):143~147.
- [12] Luijendijk T. *Lastechniek*, 1998, 64(11):9~12.
- [13] Ono M, Shiozaki T, Shinbo Y *et al.* *Quarterly Journal of Japan Welding Society*, 2001, 19(2):233~240.
- [14] Narikiyo T, Miura H, Fujinaga Sh *et al.* *J Phys D*, 1998, 31(8): 2331~2337.

(上接第 485 页)

知,双通道波导 CO₂ 激光器脉冲工作时频率稳定度比连续工作时的频率稳定度差约一个数量级。

参 考 文 献

- [1] Piltingsrud H V. *Appl Opt*, 1991, 30(27):3952~3963.

- [2] Acef O. *IEEE Trans*, 1997(46):162~165.
- [3] Freed C. *SPIE*, 1982, 335:59~68.
- [4] Ouhayoun M, Boorde C J. *Methologia*, 1997, 13:149~150.
- [5] George T, Nicolaisen H W, Bernard V *et al.* *SPIE*, 1995, 2378: 156~175.
- [6] Gryaznov N A, Kiselev V M, Sosnov E N *et al.* *SPIE*, 1993, 2095:161~166.