

激光焊接系统环境影响生命周期评价研究

张琼之, 曹华军, 葛威威

重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044

摘要: 激光焊接技术有着广泛的应用, 但仍然存在高能耗、低能效和严重的环境问题。本研究旨在用生命周期评价方法分析激光焊接的环境影响, 并将激光焊接与MIG焊、TIG焊和焊条电弧焊等典型焊接工艺进行比较。结果表明: 电力消耗、材料消耗在焊接过程中对全球变暖潜值(GWP)的影响占主导地位; 激光焊接系统中, 冷却装置电力消耗对GWP的贡献超过65%。尽管激光焊接具有更好的焊接质量, 但GWP指标高于MIG焊接和TIG焊接, 而焊条电弧焊因成品率低导致物料和能源消耗过高产生更严重的环境影响。该研究可为激光焊接工艺的改进提供理论基础。

关键词: 生命周期评价; 激光焊接系统; 清单分析; 全球变暖潜值; 资源效率

1 序言

目前, 全球气候变暖与环境退化日益严重。2021年, 全球温室气体(Green House Gas, GHG)排放量已达480亿tCO₂当量, 其中能源燃烧和工业过程产生的碳排放量占能源部门GHG的近89%^[1]。因此, 减少环境排放和提高资源效率已成为制造业可持续发展的关键性挑战^[2]。焊接工艺作为一项常用的连接加工技术, 已广泛应用于汽车、轨道交通及船舶等行业。

随着焊接技术的不断发展, 激光焊接作为一种先进的焊接工艺, 因其焊接效率高、性能强、自动化程度高而得到广泛应用和发展^[3]。该工艺特别适用于高反射、轻质材料(如铝合金和镁合金)的焊接。尽管目前针对激光焊接的工艺机理和难点已得到广泛研究并有效解决^[4-7], 但仍存在低能量转换效率、高能耗和严重的碳排放等问题^[8-10], 限制了激光焊接技术进一步的提升和应用。因此, 激光焊接在节能减排方面具有巨大潜力。

目前, 针对焊接工艺的环境影响已开展大量研究。ALEXOPOULOS等^[11]比较了激光焊接和铆接工艺用于加工飞机组件时的能耗、工艺时间、成本和碳排放, 结果表明, 激光焊接是一种更环保的工

艺。段诚茂等^[12]为降低激光焊接工艺的环境影响, 提出一种基于目标级联法的铝合金激光焊接系统碳排放优化方法。YILBAS B S等^[13]通过块参数分析研究了激光焊接的能耗和焊缝几何形貌, 并对不同合金的激光焊接进行了生命周期分析。SPROESSER G等^[14]对焊条电弧焊、激光电弧焊、电弧喷涂和改进电弧喷涂的MAG焊接进行了生命周期评估, 结果表明, 由于激光电弧焊能耗与焊接时间的比值较小, 因此对环境的影响较小。

上述研究为焊接工艺的环境评价提供了一定的基础。然而, 这些研究在分析焊接环境影响和社会属性时侧重于焊接工艺本身, 而较少关注焊接全生命周期的环境影响, 故难以揭示激光焊接的节能优化和减碳潜力。本研究将通过LCA工具分析激光焊接系统的环境影响; 同时, 将激光焊与MIG焊、TIG焊和焊条电弧焊3种典型焊接工艺进行比较。该研究有助于推动激光焊接从“注重加工质量”转向“质量、低碳和经济并重”的发展方向。

2 激光焊接系统生命周期评价方法

2.1 研究目标及边界

由于钢和铝合金在各种材料的使用中占主导地

基金项目: 国家自然科学基金(51975076)。

通信作者: 曹华军, 教授, 主要研究方向为绿色、智能制造, E-mail: hjcao@cqu.edu.cn。

位, 本研究聚焦这两种材料焊接场景下的生命周期环境影响分析, 并阐明激光焊接系统在每个阶段的环境影响。此外, 为了比较激光焊与TIG焊、MIG焊和焊条电弧焊等典型焊接工艺之间的差异, 在清单分析和结果评估中引用了这3种典型焊接工艺数据^[15]。在本研究中, 焊接工艺LCA的功能单元定义为加工25mm厚钢或铝合金的1mm焊缝。6061铝合金和316L不锈钢的焊接方案见表1。

表1 6061铝合金和316L不锈钢的焊接方案

场景	焊接材料	焊接方式
S1	6061铝合金	MIG焊
S2	6061铝合金	TIG焊
S3	6061铝合金	激光焊
S4	316L不锈钢	MIG焊
S5	316L不锈钢	TIG焊
S6	316L不锈钢	激光焊
S7	316L不锈钢	焊条电弧焊

根据LCA评价方法, 激光焊接系统的生命周期评价边界如图1所示。由于材料获取阶段和焊接阶段具有复杂多变的环境影响, 本研究聚焦考虑激光焊接系统这两个阶段, 其输入和输出特性如图2所示。

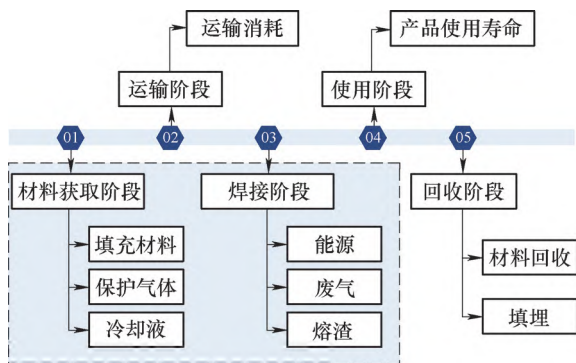


图1 激光焊接系统生命周期评价边界

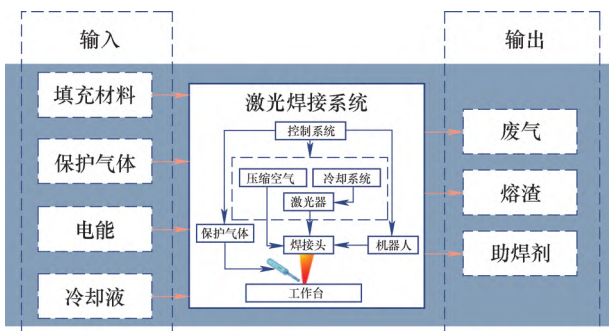


图2 激光焊接系统输入与输出特性

2.2 试验

图3所示为典型的激光焊接系统, 其主要设备包括: 激光设备、焊接机器人、冷水机和气体供应设备(空压机和氩气瓶)。各设备的技术参数见表2。为有效、准确地获得激光焊接的环境性能, 建立了激光焊接系统的材料和电力消耗监测系统, 其中分别采用DPM-C520智能电表和MF5200流量计获取系统的电能消耗量和气体消耗量。



图3 铝合金激光焊接系统设备

表2 激光焊接系统各设备技术参数

设备	参数	
IPG YLR-4000 光纤激光器	最大输出功率/W	4000
	辐射波长/nm	1070
	光束质量BPP / mm · mrad	6.5
	输出光纤芯线直径/μm	300
Precitec YW50 焊枪头	光束模式	TEM00
	焦点处光斑直径/mm	0.3
Riedel PC160.01 NZ-DIS冷却器	焦距/mm	250
	激光冷却水温度/°C	20~22
ABB IRB4000 Robot	光学器件去离子水温度/°C	27~33
	最大负载/kg	60
	重复定位精度/mm	0.07

基于大量的预试验和本团队前期相关研究^[16, 17], 获得了激光焊接工艺参数窗口: 激光功率为1.5~1.8 kW、焊接速度为5~7m/min、离焦量在-6~6mm之间。本研究收集了上述加工参数窗口内的清单数据。

3 激光焊接系统清单分析

根据系统边界和功能单元收集金属焊接工艺的清单数据，对于每种焊接工艺过程均按照输入（能源和资源消耗等）和输出（气体排放等）进行描述。

根据图1和图2中定义的激光系统边界，提取了不同焊接工艺下铝和钢的焊接清单数据，具体的输入和输出数据见表3。

表3 激光焊接工艺的清单数据

参数	不锈钢	铝合金
平均功率/kW	3.06	2.98
焊接能耗/kW·h	1.835	1.78
惰性气体 (Ar) /kg	2.5	2.5
冷却液/kg	8.73	8.73
填充材料/kg	4.1	1.58
烟雾排放/g	2.55E-05	2.67E-05

4 结果与讨论

4.1 激光焊接系统评价结果

图4所示为激光焊接系统生命周期评价结果，其比较了激光焊接系统中各子系统的不同输入和输出的环境负担。

在全球变暖潜能值（GWP）指标中，水冷机能耗产生的排放达67.97%，水冷机在材料获取阶段产生的排放则只占0.39%。然而，承担激光焊接工艺的激光设备仅占系统的11.16%。由此不难发现，冷却系统是激光焊接系统碳排放的主要原因。对于运动系统而言，由于其负载较小，因此所占其份额较小，为5.78%。气体装置所占份额为0.89%。

激光焊接系统环境影响的主要来源是电能消耗，图4显示了几乎所有类别中水冷能量的影响最大。仅考虑在使用阶段时，电能消耗产生的碳排放占整个系统碳排放的97.32%。对于冷却系统而言，与其他设备相比，它具有较高的运行和待机功率。此外，工件夹紧时间的长短与电力消耗直接相关。

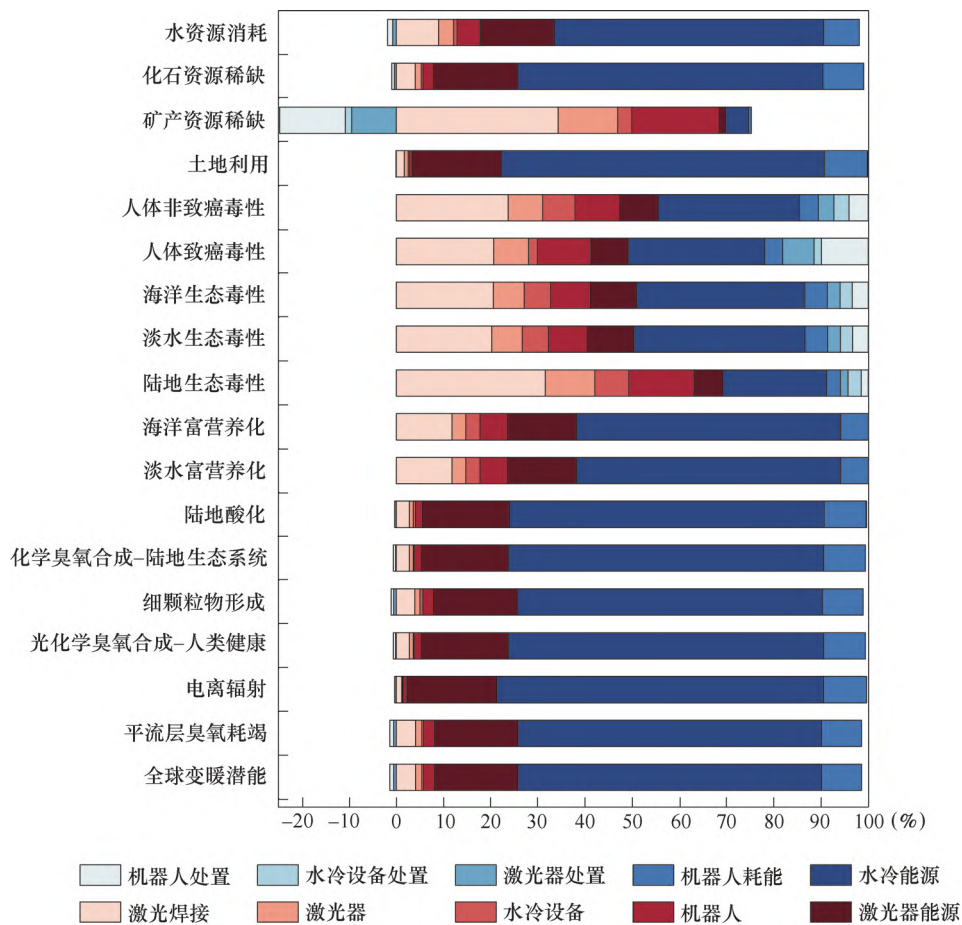


图4 激光焊接系统生命周期评价结果

工件夹紧时，系统处于待机状态，待机时间与焊接时间相比相对较长。因此，减少系统的待机时间以及工件夹紧时间，可有效地降低激光焊接系统的环境影响。

4.2 不同焊接方案评价与比较

在焊接不同的材料时，仅考虑焊接工艺过程中（不考虑整个系统所带来的环境影响）7种情况下的总GHG排放量，如图5所示。结果表明，填充材料在焊接过程中占环境负担的主要份额，电能紧随其后。

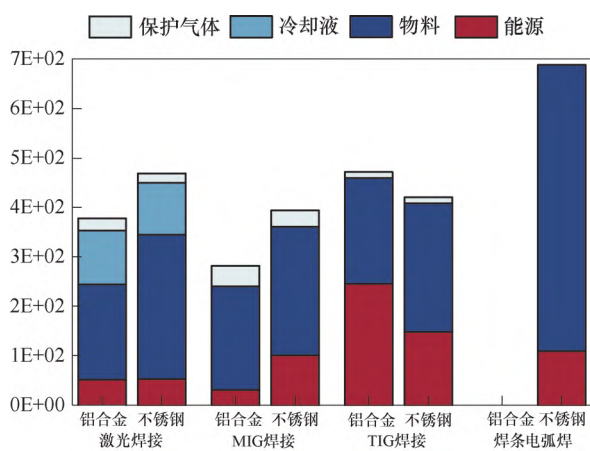


图5 考虑不同材料对同一焊接方式的GWP结果

在同一焊接方式下，当焊接不锈钢和铝合金时显示出差异。由于铝合金具有更好的导热性（约为钢的3倍）和较大的线性膨胀系数（约为钢材的3倍），这导致在焊接铝合金时焊接速度更快，从而降低电能消耗^[18]；铝合金具有良好的成形性、比强度和耐蚀性，且密度仅为钢的1/3^[19]，因此在相同的情况下，铝合金具有更高的材料利用率。

尽管TIG焊在焊接铝和镁等活性金属时具有相当大的优势，但钨电极易蒸发，以及高电流的工作环境，使焊缝经常散布有从钨电极蒸发的颗粒，这极大地影响了焊缝的质量。同时，为了获得更优异的焊接性能，焊接速度极大地影响其加工效率。因此，电能对TIG焊接过程中的环境性能贡献更大。

铝合金和钢的熔点差异很大。铝合金的熔点为500~660℃，而304不锈钢的熔点为1398~1454℃^[20]。显然，在不考虑焊缝质量的情况下，MIG焊接过程的时间相对较短，这必然导致在焊接铝时，电能在这GWP这一指标中的贡献相对较小。

除此之外，仅考虑焊接这工艺过程（不考虑整

个系统所带来的环境影响），对于不同的焊接工艺，图6显示了7种情况下的总GHG排放量。结果表明，通常手动工艺比所选的自动工艺对环境的影响更大。

激光焊由于其高能量密度（高达106W/cm²）^[21]，因此在焊接具有高熔点和高热导率的金属时具有极大的优越性。激光焊接可以实现比其他焊接更高的焊接速度。较高的焊接速度意味着较短的焊接时间，这直接导致在焊接过程中对环境影响较小。然而，由上述分析可知，由于激光焊接工艺的集中能量和需要为其配备冷却系统，冷却系统电能消耗导致激光焊接工艺的环境表现并不优越。

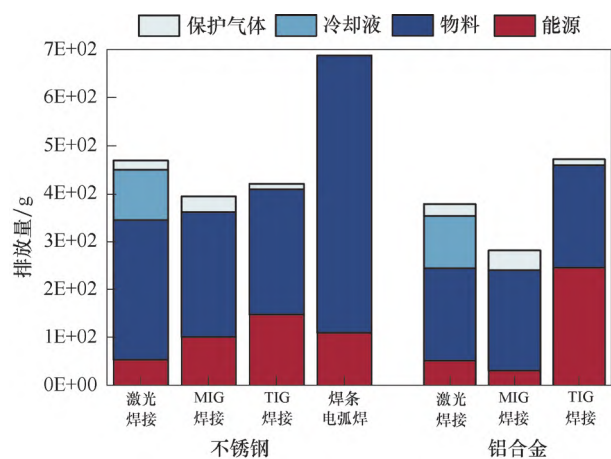


图6 考虑不同焊接方式对同一材料的GWP结果

根据焊接钢的结果分析，TIG焊的低热功率使其焊接速度相对较慢，导致其能耗和热损失巨大，其电能贡献占比较大。尽管MIG焊具有更快的焊接速度（300~500 mm/min）和更高的熔敷速率的优点，但由于需要添加焊丝手工焊接，热量输入不稳定，这导致对其电能影响的贡献增加。

从一般角度来看，当焊接铝合金时，无论焊缝质量如何，MIG焊工艺在环境性能方面都优于其他金属电弧焊工艺。薄板焊接主要采用TIG焊，而MIG焊主要用于板材厚度超过3mm的产品^[22]。当焊接相同厚度的基材时，很明显MIG焊的焊接效率会更高，但同时其热影响会破坏焊接质量。

5 结束语

本研究利用LCA工具对激光焊接系统进行环境影响分析，搭建了6061铝合金和316L不锈钢激光焊接试验平台，并将激光焊与MIG焊、TIG焊和焊条

电弧焊等典型焊接工艺的GWP指标进行了比较。主要研究结论如下。

1) 对于激光焊接工艺, 冷却系统比激光设备具有更高的环境影响。冷却系统的能耗占环境影响的主导地位, 对GWP的贡献超过65%。

2) 根据评价结果, 每种焊接工艺GWP这一环境性能不同。其中, MIG焊在焊接铝合金时碳排放最少; 激光焊具有更好的焊接质量, 但GWP指标高于MIG焊和TIG焊; 因成品率低导致物料和能源消耗过高, 焊条电弧焊具有最高的环境影响。

3) 针对所研究的不同焊接工艺, 首先电能消耗在GWP的环境影响中占主导地位, 其次是材料消耗。

本研究聚焦焊接过程中材料获取阶段和焊接加工阶段的环境影响分析。未来, 可考虑焊接工艺的前处理和后处理, 以综合揭示焊接工艺对焊接性能的环境影响。

参考文献:

- [1] 曹华军, 李洪丞, 曾丹, 等. 绿色制造研究现状及未来发展策略[J]. 中国机械工程, 2020, 31(2): 135-144.
- [2] WANG H C, SU J Q, CAO H L. Key factors in the technological catch-up of China's traditional industry: Changhong case exploration[J]. Journal of Knowledge Based Innovation in China, 2013, 5(1): 32-43.
- [3] KIL S C, KIM H T. Welding Technology of lightweight alloys[J]. Mater Sci Forum, 2008, 580-582: 5-80.
- [4] HOU J C, LI R F, XU C, et al. A comparative study on microstructure and properties of pulsed laser welding and continuous laser welding of Al-25Si-4Cu-Mg high silicon aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68(1-2): 657-667.
- [5] WANG J T, FU X, ZHANG L B, et al. A short review on laser welding/brazing of aluminum alloy to steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(9-10): 2399-2411.
- [6] HAROONI M, MA J, CARLSON B, et al. Two-pass laser welding of AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2015, 216: 114-122.
- [7] AMBS P, KAIERLE S, DAHMEN M, et al. Eco-efficiency of laser welding applications[J]. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8065: 80650T.
- [8] ZHOU J F, ZHOU D W, LIU J S. Numerical and experimental investigation of magnesium/aluminum laser welding with magnetic field[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(1-2): 545-559.
- [9] DAHMEN M, GÜDÜKKURT O, KAIERLE S. The ecological footprint of laser beam welding[J]. Physics Procedia, 2010(5): 19-28.
- [10] KELLENS K, RODRIGUES G C, DEWULF W, et al. Energy and resource efficiency of laser cutting processes[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 854-864.
- [11] ALEXOPOULOS N D, GIALOS A A, ZEIMPEKIS V, et al. Laser beam welded structures for a regional aircraft: weight, cost and carbon footprint savings[J]. Journal of Manufacturing System, 2016, 39: 38-52.
- [12] 段诚茂, 曹华军, 李洪丞, 等. 基于碳效率的铝合金激光焊接工艺系统低碳优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(5): 10.
- [13] YILBAS B S, SHAUKA M M, AFZAL A A, et al. Life cycle analysis for laser welding of alloys[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 126: 1-7.
- [14] SPROESSER G, CHANG Y J, PITTNER A, et al. Life cycle assessment of welding technologies for thick metal plate welds[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 108: 46-53.
- [15] KIM H C, WALLINGTON T J. Life cycle assessment of vehicle lightweighting: A physics-based model of mass-induced fuel consumption[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(24): 14358-14366.
- [16] HUANG Z, CAO H J, ZENG D, et al. A carbon efficiency approach for laser welding environmental performance assessment and the process parameters

(下转第40页)

6 结束语

在采用附加传感器系统中,无论是电容式、电感式、超声波或激光,都有很多弊病,那就是与切割火焰不同步。而采用火焰自身导电性原理构成的火焰高度传感器,可以很好地解决该问题,不存在工件大小和切割位置对割炬高度的测量影响。在多次试验中,分别采用了固定激励电压进行割炬高度的测量。试验中改变切割钢板的大小,并未发现对割炬高度测量产生影响,而改变钢板材质同样未发现测量电路的输出电压受到影响,证明采用该原理的割炬高度传感器可以用于数控切割机的自动割炬高度调整系统中。

综上所述,采用切割火焰作为自动调高系统的测量对象,是一个很好的解决方案。

参考文献:

[1] 王竹勤, 兰生. 局部热力学平衡状态下的等离子体电导率计算[J]. 原子与分子物理学报, 2015

(2): 259-263.

[2] 李景昌. Saha方程的一种新的推证[J]. 吉林工业大学学报, 1986 (4): 7-11.

[3] 王藩侯, 经福谦. 应用Saha方程计算氩等离子体的Hugoniot物态方程[J]. 原子与分子物理学报, 2001, 18 (3): 285-288.

[4] 陈栋泉, 陈湘涛. 高温气体电离度的近似计算方法[J]. 计算物理, 1985 (2): 148-160.

[5] 张闪影, 汤小红, 赖明建, 等. 钢板气体火焰切割温度场的数值模拟分析[J]. 焊接技术, 2013, 40 (2): 10-13.

[6] 梁桂芳. 切割技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

[7] 杨兵兵. 低碳钢薄板氧-乙炔手工气切割工艺[J]. 热加工工艺, 2009, 38 (15): 143-145.

MW 20221208

(上接第36页)

decision-making[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114 (7-8): 2433-2446.

[17] CAO H J, LI Y N, LI H CH, et al. Multi-objective response evaluation for carbon emission and welding performance of laser welding process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121: 3005-3023.

[18] LI Y, NICOLE K, JAN C A. An energy model of machine tools for selective laser melting[J]. Procedia CIRP, 2018, 78: 67-72.

[19] OLADIMEJI O O, TABAN E. Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys[J]. Welding in the World, 2016, 60 (3): 1-43.

[20] THAKARE S B, KALYANKAR V D. Friction stir welding of T joints of dissimilar aluminum alloy: A review. Advances In Mechanical Design, Materials and Manufacture: Proceedings of the

First International Conference on Design, Materials and Manufacture (ICDEM 2018) [C]: USA: American Institute of Physics Conference Series, 2018.

[21] WANG H Y, HAN R B, ZHANG Z X, et al. Riveting-welding hybrid bonding of high-strength steel and aluminum alloy[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34 (15): 1671-1680.

[22] COSTA G C D S, ANDRÉ A D R. Evaluation of the TIG-MIG/MAG welding process in direct polarity[J]. SN Applied Sciences, 2020, 2 (2): 1-6.

MW 20230130