

Nd:YAG 激光+脉冲 MAG 电弧复合热源规范参数对 平板堆焊焊缝表面成形的影响

秦国梁, 雷 振, 林尚扬, 何 实, 王旭友, 王 威

(中国机械科学研究院 哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150080)

摘 要: 利用余高-熔宽比表示焊缝表面铺展性并与焊缝余高一起作为参数来评价复合热源平板堆焊焊缝的表面成形, 通过试验研究了 Nd:YAG 激光+脉冲 MAG 复合热源堆焊过程中焊接规范参数对复合热源平板堆焊焊缝表面成形的影响并分析了激光对复合热源堆焊焊缝表面成形的影响。研究表明, 在电弧功率变化过程中, 随着激光功率的增大, 其对平板堆焊焊缝表面成形的影响也逐渐增大; 焊接速度变化过程中, 激光束能量的加入不仅改善堆焊焊缝表面成形还极大地提高了焊接速度; 而在光丝间距和离焦量变化过程中, 激光束对复合热源平板堆焊焊缝表面成形的影响很小。

关键词: 激光焊接; 复合热源焊接; 脉冲 MAG 焊; 焊缝成形; 平板堆焊

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)03-0023-05

Influences of Welding Parameters on Weld Appearance in Nd:YAG Laser + Pulsed MAG Hybrid Cladding

QIN Guo-liang, LEI Zhen, LIN Shang-yang, HE Shi, WANG Xu-you, WANG Wei

(Harbin Welding Institute, China Academy of Machinery science & technology Harbin 150080)

Abstract: The reinforcement-width ratio was used to indicate the welding metal spreadability, and to evaluate the welding appearance of bead-on-plate in Nd:YAG laser + pulsed MAG(Metal Active Gas) hybrid cladding. The influences of hybrid welding parameters on welding appearance of bead-on-plate were studied by experiments. The results showed that their influence will be strengthened with increasing of laser power in variation of arc power. The combination of Nd:YAG laser energy into pulsed MAG welding can not only improve the hybrid weld appearance, but also greatly increase the welding speed. The influence of Nd:YAG laser on hybrid weld appearance is light in variation of laser-arc distance and defocusing distance.

Key words: laser welding; hybrid welding; pulsed MAG welding; weld appearance; bead-on-plate

0 引 言

激光+GMAW (Gas Metal Arc Welding) 复合热源焊接是将激光焊接和GMAW焊接结合起来实现优质高效焊接生产的一种新的低成本焊接工艺。在激光+GMAW复合热源焊接过程中, 可以通过GMAW焊接来提高焊缝的搭桥能力, 激光焊增强了对工件装配误差变化的适应性, 降低了对工件装配误差的要求; 激光束则可保证在高速焊接条件下获得理想的焊缝熔深和规则的焊缝成形^[1]。因此, 激光焊接和GMAW焊接具有很强的互补性, 将这两种焊接工艺有机地结合起来, 既可以克服激光焊过

程中工件装配要求高、焊缝搭桥能力差的缺点, 又可以弥补GMAW焊中焊接速度慢、效率低、变形大等不足, 实现优势互补, 实现优质高效焊接生产。

作为一种优质高效的焊接方法, 激光+GMAW复合热源焊接具有广阔的市场应用前景和很强的竞争力, 也是当前国际上的一项热门技术和研究热点^[3]。但是目前研究多集中在激光+GMAW复合热源焊接工艺对焊缝熔深和坡口搭桥能力等优势研究上^[1,2,4,5], 而忽略在GMAW焊接过程激光能量的加入对焊缝表面成形也具有较大的影响。

将激光+电弧复合热源焊接技术应用于表面堆焊不仅可以提高焊接速度、提高表面堆焊效率, 还可以通过激光能量的加入改善焊缝表面成形, 是一种很有应用前景的表面堆焊技术。

收稿日期: 2006-04-12; 修回日期: 2006-04-27

作者简介: 秦国梁(1975-), 男(汉), 山东博兴人, 工程师, 博士。

文中通过试验研究了Nd: YAG激光+脉冲MAG复合热源焊接过程中焊接规范参数如电弧功率、激光功率、焊接速度、光丝间距、离焦量等对复合热源平板堆焊缝表面成形的影响并分析了复合热源焊接过程中激光对平板堆焊缝表面成形的影响机制。

1 试验条件及试验方法

1.1 试验条件

试验用激光器为额定功率2 kW的Nd:YAG固体激光器,输出波长为1.06 μm 的连续波激光,由内直径为0.6 mm的光纤传输,聚焦透镜焦距为200 mm,焦点直径为0.6 mm。GMAW焊接电源为Fronius TPS5000 数字化电源,对于一定材料和直径的焊丝,焊接电流、电弧电压、送丝速度等焊接规范参数一体化调节,工作模式为脉冲。复合方式为激光在前、电弧在后;保护气为Ar+18 %CO₂。试验参数见表1。

表1 试验条件

Table 1 Conditions of test				
焊丝直径/ ϕ/mm	干伸长/ l/mm	熔滴过渡/ (熔滴脉冲)	光丝夹角/ $(^\circ)$	试验材料
1.2	16	1	25.6	Q235 钢

试验用的复合热源焊接机头为哈尔滨焊接研究所自行开发的Nd:YAG激光+GMAW复合热源焊接机头,如图1所示。

1.2 试验方法

在Nd:YAG激光+脉冲MAG电弧复合热源平板堆焊过程中,电弧功率、激光功率、焊接速度、光丝间距、离焦量等参数离散变化,在获取较好焊缝成形的条件下测量每个焊接规范下的复合热源焊缝余高和熔宽,并计算其余高-熔宽比,以此研究复合热源焊接规范参数对平板堆焊缝表面成形的影响。

1.3 焊缝表面成形参数

复合热源平板堆焊缝表面成形可以用余高和表面铺展性这两个参数来描述。图2为一焊接规范下的Nd:YAG激光+脉冲MAG电弧复合热源平板堆焊缝。



图1 激光+GMAW电弧复合热源焊接机头

Fig.1 Laser + GMAW arc composite heat jointing

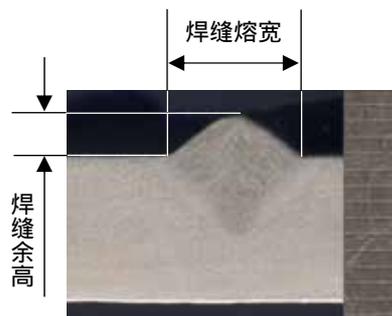


图2 平板表面堆焊焊缝表面成形参数

Fig.2 Figuration parameters of welding bead surface of flat surface welding

堆焊焊缝表面金属铺展性从微观上可以用润湿性来描述,但由于各种因素对材料润湿性的影响而很难用润湿性从宏观上定量评价焊缝表面铺展性的优劣。因而定义了一个从宏观上描述焊缝表面铺展性的参数—余高-熔宽比 R_{rw} ,即用余高去除熔宽所得的商。一般地,余高越小,熔宽越宽,焊缝的余高熔宽比越小,表明焊缝表面铺展性越好。用余高-熔宽比和润湿性描述焊缝表面铺展性具有较好的对应关系,润湿性好的焊缝表面铺展性也好,其余高-熔宽比也较小。余高-熔宽比一方面可以描述余高的相对大小,另一方面也可以描述焊缝表面铺展性的好坏。

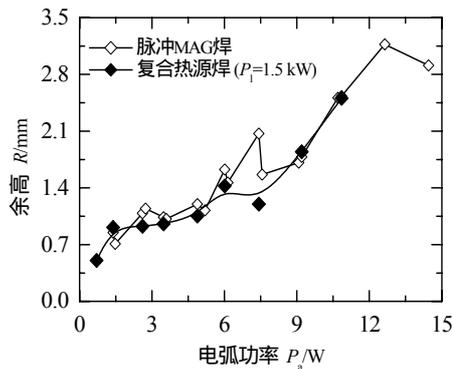
2 试验结果及讨论

2.1 电弧功率对复合热源平板堆焊缝表面成形的影响

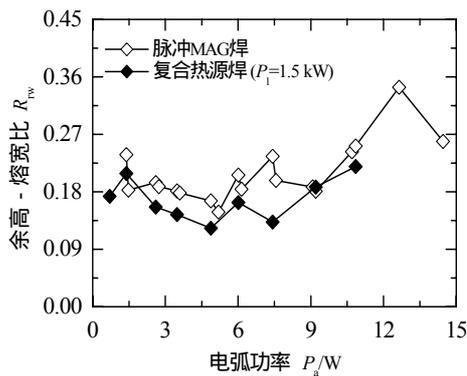
图3为焊接速度为 $v = 25 \text{ mm/s}$ 、离焦量为 $\Delta z = 1 \text{ mm}$ 、光丝间距为 $D_{la} = 1 \text{ mm}$ 条件下Nd:YAG激光+脉冲MAG复合热源焊接和相同电弧参数下脉冲MAG平板堆焊缝表面成形参数随电弧功率的变

化。

从图 3 中可以看出,脉冲 MAG 焊和 Nd:YAG 激光+脉冲 MAG 复合热源平板堆焊缝余高随着电弧功率的增大而增大,焊缝余高 - 熔宽比随电弧功率的变化不大而脉冲 MAG 焊缝余高 - 熔宽比随电弧功率的增大而有增大的趋势。但从图中可以看



(a) 余高



(b) 余高 - 熔宽比

图 3 平板堆焊缝表面成形参数随电弧功率的变化

Fig.3 Variation of figuration parameters of welding line of flat surface welding with arc power

出复合热源平板堆焊缝余高和余高熔宽比要稍小于脉冲 MAG 焊缝的余高和余高熔宽比。这说明在电弧功率变化过程中,激光束能量的加入可以降低复合热源平板堆焊缝余高并改善其表面铺展性,但是其影响力度有限。

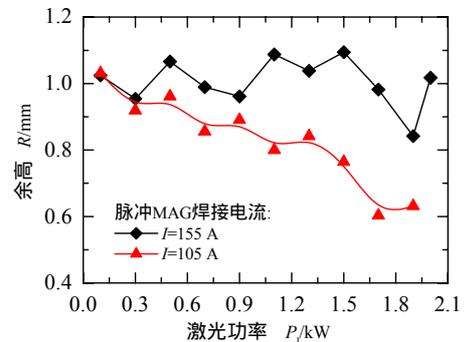
在试验过程中电弧功率的增加是通过增大送丝速度而增大焊接电流实现的。因而电弧功率增大,送丝速度也增大,单位时间熔化的焊丝量增多。对于平板堆焊来说,在电弧加热范围变化不大的情况下,焊丝熔化量的增多意味着更多的熔化焊丝在平板上堆积,所以余高增加。在 Nd:YAG 激光+脉

冲 MAG 复合热源焊接过程中,激光束辐照在电弧(熔池)前部能够预热工件,增强工件表面润湿性,有利于熔融的金属在工件表面铺展开来,改善焊缝金属表面铺展性、降低焊缝余高。但由于激光辐照区域很小且多辐照在熔池前部,因此激光束对工件预热作用同电弧大范围加热相比是很有限的,因而只是对焊缝表面铺展性的改善有所帮助,但其影响力度不大。

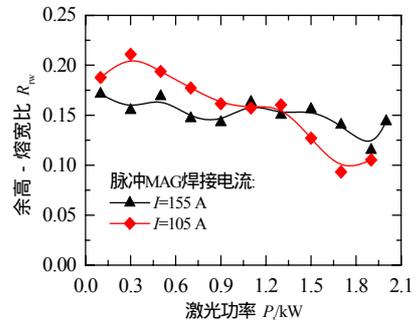
2.2 激光功率对复合热源平板堆焊缝表面成形的影响

图 4 为焊接速度为 $v = 25 \text{ mm/s}$ 、离焦量为 $\Delta z = 1 \text{ mm}$ 、光丝间距为 $D_{la} = 1 \text{ mm}$ 下 Nd:YAG 激光+脉冲 MAG 复合热源平板堆焊缝表面成形参数随激光功率的变化。

从图 4 (a)中可以看出,对于较大焊接电流下,激光功率在较小时对复合热源平板堆焊缝余高影响不大,但在激光功率较大时,激光束能量的加入可以减小复合热源平板堆焊缝余高。而在较小焊接电流下,复合热源平板堆焊缝余高随着激光



(a) 余高



(b) 余高 - 熔宽比

图 4 平板堆焊缝表面成形参数随激光功率的变化

Fig.4 Variation of figuration parameters of welding line of flat surface welding with laser power

功率的增大而减小。这说明随着激光功率的增大,激光对焊缝表面成形的影响增大。在图 4(b)中,两种电流条件下复合热源平板堆焊焊缝余高-熔宽比随着激光功率的增大而减小,这说明激光束能量的加入能够改善复合热源平板堆焊焊缝的表面铺展性。

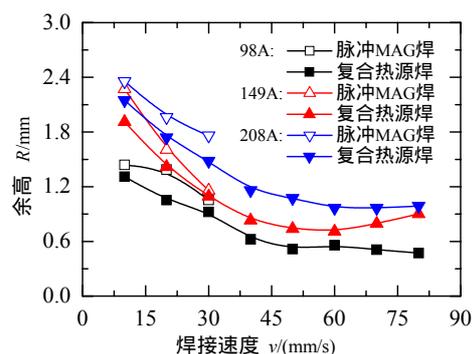
在较小焊接电流条件下,电弧相对较弱,对激光束的影响也较弱,因而激光束能量的加入可以减小焊缝余高和余高-熔宽比,改善焊缝表面成形。在焊接电流较大的条件下,电弧较强,对激光束的吸收、散射等作用较强,因而在激光功率较小对焊缝余高的影响较小。随着激光功率的增大,透过电弧的激光束能量也逐渐增多,可以有效提高焊接热输入,改善工件表面的润湿性,从而使复合热源平板堆焊焊缝余高和余高-熔宽比随着激光功率的增大而减小。

2.3 焊接速度对复合热源平板堆焊焊缝表面成形的影响

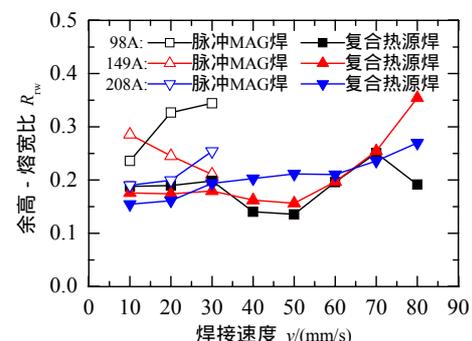
在离焦距为 $\Delta z = 1$ mm、激光功率 $P_1 = 2.0$ kW和光丝间距 $D_{1a} = 2$ mm条件下,脉冲MAG焊接、Nd:YAG激光焊接以及Nd:YAG激光+脉冲MAG复合热源平板堆焊焊缝表面成形参数随焊接速度的变化,如图 5 所示。

图 5(a)中,随着焊接速度的增加,脉冲MAG焊缝和Nd:YAG激光+脉冲MAG复合热源平板堆焊焊缝余高都随焊接速度的增大而减小,并且Nd:YAG激光+脉冲MAG复合热源平板堆焊焊缝余高要小于脉冲MAG焊缝余高;在图 5(b)中Nd:YAG激光+脉冲MAG复合热源平板堆焊焊缝余高-熔宽比要小于脉冲MAG焊缝的余高-熔宽比。图 5 说明在脉冲MAG焊接过程中加入一定功率的Nd:YAG激光能够有效改善焊缝表面金属的铺展性,可以改善焊缝成形。

图 5 的曲线也说明在脉冲MAG焊接过程中,Nd:YAG激光的加入可以大幅度地提高同一焊接规范参数下的脉冲MAG的最大焊接速度。这主要是由于激光的加入不仅稳定了高焊接速度条件下脉冲MAG电弧,而且还降低了脉冲MAG电弧引燃和燃烧电阻,使脉冲MAG电弧在高焊接速度条件下依然能够稳定引燃和燃烧,从而使其焊接速度得到极大地提高。



(a) 余高



(b) 余高-熔宽比

图 5 平板堆焊焊缝表面成形参数随焊接速度的变化

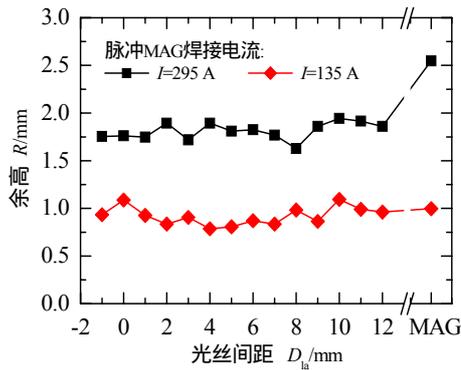
Fig.5 Variation of figuration parameters of welding line of flat surface welding with welding speed

2.4 光丝间距对复合热源平板堆焊焊缝表面成形的影响

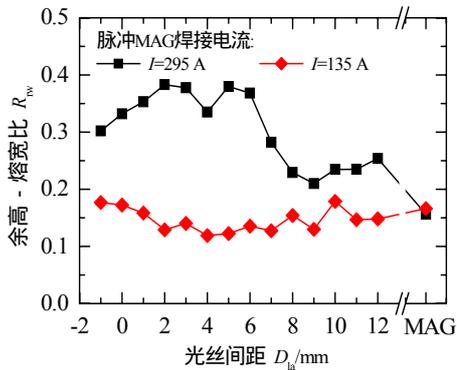
光丝间距是激光到电弧中心之间的距离,在试验中一般以激光光斑中心到未起弧时焊丝延长线与工件的交点的距离表示。一般以正负号来区分激光光斑与电弧的相对位置:在焊接方向上,激光光斑在焊丝之前为正,否则为负。

在激光功率 $P_1 = 2.0$ kW和焊接速度 $v = 25$ mm/s、两种焊接电流下Nd:YAG激光+脉冲MAG复合热源平板堆焊焊缝表面成形参数随光丝间距的变化如图 6 所示。

从图 6(a)中可以看出,焊缝余高随光丝间距的变化不大,说明光丝间距对复合热源平板堆焊焊缝表面余高的影响不大。从图 6(b)中可以看出,在大焊接电流条件下,光丝间距在小于 6 mm 时的焊缝表面余高-熔宽比要大于光丝间距超过 6 mm 时的焊缝表面余高-熔宽比,这说明光丝间距变化过程中,在大焊接电流条件下较小的光丝间距会使焊缝表面



(a) 余高



(b) 余高 - 熔宽比

图 6 平板堆焊缝表面成形参随光丝间距的变化

Fig.6 Variation of figuration parameters of welding line of flat surface welding with space between light thread

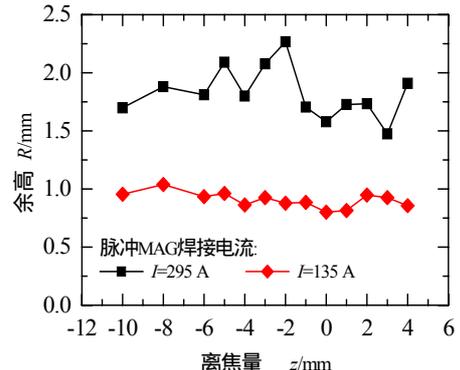
的铺展性变差；而在小焊接电流条件下，光丝间距对焊缝表面余高熔宽比影响不大，意味着小焊接电流条件下光丝间距对焊缝表面铺展性的影响相对较小。

2.5 离焦量对复合热源平板堆焊缝表面成形的影响

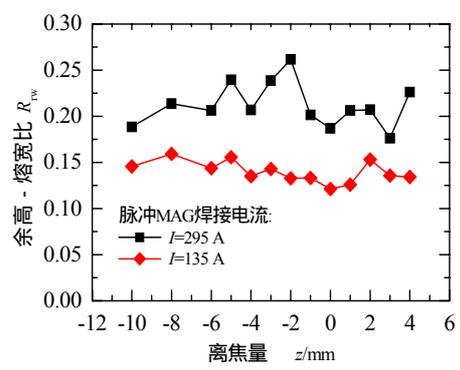
同激光焊接一样，在激光+电弧复合热源焊接过程中也是用离焦量来表征激光光斑的大小，离焦量符号的定义：以激光束传播方向为正方向，激光束焦点在工件表面以下离焦量符号为正，否则为负。

图 7 为在激光功率 $P_1 = 2.0$ kW和焊接速度 $v = 25$ mm/s条件下两种焊接电流下Nd:YAG激光+脉冲MAG复合热源平板堆焊缝表面成形参数随离焦量的变化。

从图 7 中可以看出，随着激光束焦点到工件上表面距离的减小，辐照在工件表面上激光光斑越小，复合热源平板堆焊缝余高和余高-熔宽比都



(a) 余高



(b) 余高 - 熔宽比

图 7 平板堆焊缝表面成形参数随离焦量的变化

Fig.7 Variation of figuration parameters of welding line of flat surface welding with off-focus distance

有随之减小的趋势，特别是小焊接电流条件下焊缝表面余高和余高-熔宽比随离焦量的变化更能体现出焊缝余高和余高-熔宽比随辐照在工件表面的激光光斑变小而减小的变化趋势，但其变化幅度不大。这说明较小的离焦量（较小的激光光斑）有利于改善复合热源平板堆焊缝表面的铺展性，但对其影响相对较小。这主要是由于激光光斑随离焦量变化而变化的量与脉冲MAG电弧加热区域相比小的可以忽略不计，从宏观上对余高和余高熔宽比来说，激光光斑大小的变化是可以忽略不计的。

3 结论

(1) 定义了余高-熔宽比从宏观上描述、评价平板堆焊缝表面铺展性。

(2) 在电弧功率变化过程中，激光对复合热源平板堆焊缝表面成形的影响较小，但是随着激光功率的增大，起到对复合热源平板堆焊缝表面成形的影响也逐渐增大。

(下转第 32 页)

(上接第 27 页)

(3) 在脉冲 MAG 焊接过程中, 激光束能量的加入不仅改善平板堆焊焊缝表面成形, 还极大地提高了堆焊速度。

(4) 在光丝间距和离焦量变化过程中, 激光束对焊缝表面成形的影响很小, 可以忽略不计。

参考文献:

- [1] Kinney P. and Farson D. Optimization of an innovative hybrid welding process for structure fabrication [C]. ICALEO'2003. 2003, Section A: 21-30.
- [2] Petring D. and Fuhrmann C. Recent progress and innovative solutions for laser-arc hybrid welding [C]. Pro. of the 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics 2004. April 19-21, 2004. Melbourne, Australia 2004: 1-4.
- [3] 林尚扬, 关桥. 我国制造业焊接生产现状与发展战略研究 [R]. 中国工程院咨询项目总结报告. 2003.
- [4] Bagger C, Olsen F O. Comparison of plasma, metal inactive gas(MIG) and tungsten inactive gas(TIG) processes for laser hybrid welding [C]. ICALEO'2003. Section A: 11-20.
- [5] Lee K D, Park K Y A. study on the process robustness of Nd:YAG laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy 6016-T6 [C]. ICALEO'2003. 2003, Section A: 48-55.

作者地址: 哈尔滨市和兴路 111 号 150080

Tel: (0451) 86300539; 13074550909

E-mail: Laizerpro@soho.com