

# Nd:YAG 激光 + CMT 电弧复合热源平焊工艺参数对焊缝成形的影响

刘西洋<sup>1,2</sup>, 孙凤莲<sup>1</sup>, 王旭友<sup>2</sup>, 王·威<sup>2</sup>, 杜兵<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨焊接研究所 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**以304不锈钢为对象,借助焊缝成形参数来评价YAG激光+CMT电弧复合热源平焊焊缝的成形特征,研究了Nd:YAG激光+CMT复合热源平焊过程中焊接工艺参数对焊缝成形的影响.结果表明,在CMT电弧焊接中加入激光可以改善平焊焊缝成形;与其它复合热源焊接相对比激光功率对熔深影响较大,对平焊焊缝成形的影响程度与焊接电流有关;采用大的光丝间距有利于焊缝金属的铺展;离焦量对平焊焊缝的熔深影响明显,对焊缝金属铺展性的影响可以忽略不计.

**关键词:**激光焊接;复合热源焊接;CMT焊接;焊缝成形

**中图分类号:** TG456 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2010)06-0107-05

## Influences of Nd:YAG Laser + CMT Arc Hybrid Flat Welding Parameters on the Welding Appearance

LIU Xi-yang<sup>1,2</sup>, SUN Feng-lian<sup>1</sup>, WANG Xu-you<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, DU Bing<sup>2</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China;  
2. Harbin Welding Institute, Harbin 150080, China)

**Abstract:** This paper evaluates the appearance characteristics of YAG laser + CMT arc hybrid flat welding on 304 stainless steel according to the welding appearance parameters. The influences of welding parameters on weld appearance during Nd:YAG laser + CMT arc hybrid flat welding are studied. The results indicate that hybrid welding appearance can be improved by adding laser during CMT arc welding. The impact of laser power on the penetration depth is greater than other hybrid welding. The significance of the influence on welding appearance is dependent on the welding current. The spreading metal performance is improved by using large light wire distance. Defocus amount has a significant influence on the welding penetration of flat welding, while its effect on the spreading metal is very limited.

**Key words:** laser welding; hybrid welding; CMT welding; weld appearance

## 0 引言

激光-电弧复合焊接技术是由伦敦帝国大学的W. Steen于20世纪70年代末首先提出的<sup>[1-2]</sup>.由

于激光电弧复合焊接技术避免了单独激光焊和单独电弧焊的缺点,具有提高焊接速度,增强焊接接头的桥接性,降低焊接成本等优点,从而形成了一种高效的焊接热源<sup>[3-4]</sup>.

在诸多焊接方法中,由于激光—MIG/MAG

收稿日期: 2010-01-12

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAF04B10);机械科学研究总院技术发展基金资助项目(20080601)

作者简介: 刘西洋(1980—),男,硕士研究生,E-mail:2004liuxiyang@163.com;

孙凤莲(1957—),女,教授,博士生导师.

复合热源焊接方法易于实现自动化,焊接熔深大,焊接速度快,接头质量好等优点,已经成为复合热源焊接领域研究的热门方向<sup>[5]</sup>.

CMT(Cold Metal Transfer)冷金属过渡技术<sup>[6]</sup>由 Fronius 公司 2002 年研究成功,CMT 技术的出现,赋予了 MIG/MAG 一种新的熔滴过渡的形式.

这种熔滴过渡形式实现了送丝过程与焊接过程(熔滴过渡过程)的统一,即熔滴的过渡过程是由送丝运动变化来控制的,焊丝的“前送—回抽”频率高达 70 次/s,使 CMT 焊接具有焊接热输入量低,变形小,焊接速度快,电弧稳定,飞溅小,焊缝质量重复精度高等优点,适用于镀锌钢板和铝的焊接,但因其热输入低,熔深浅,目前只适用于薄板的高速焊接<sup>[6]</sup>.

考虑如果在 CMT 焊接中复合其它热源,不但能保持 CMT 焊接的优点,还能得到较大的熔深,这将具有其深远的意义.目前,在国内外 CMT 复合其它热源相关报道极少,本文通过试验研究了 Nd:YAG 激光 + CMT 复合热源焊接过程中焊接工艺参数对复合热源平焊焊缝成形的影响.

## 1 试验条件和方法

### 1.1 试验条件

激光器为德国 HAAS 公司生产的 HL2006D 型大功率连续输出 Nd:YAG 固体激光器,激光器为额定功率 2 kW. MIG 焊机为奥地利 Fronius 公司生产的 TPS4000 CMT 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、送丝速度等焊接工艺参数一体化调节.自行研制的高精度直线行走机构,行程 1.6m,最大焊接速度 10m/min,焊枪夹持机构可进行 5 维调节,焊接时的保护气体采用纯 Ar,气体流量 15~20 L/min,试验材料 304 不锈钢,焊丝材料为 308L,焊丝直径 1.2mm,干伸长 14mm.

### 1.2 试验方法

在 Nd:YAG 激光 + CMT 电弧复合热源平焊过

程中,光丝间距、激光功率、焊接电流、离焦量等参数离散变化,测量每个焊接工艺下的复合热源焊缝熔深、余高、熔宽,并计算其余高-熔宽比,以此分析 Nd:YAG 激光 + CMT 电弧复合热源焊接工艺参数对焊缝成形的影响.

### 1.3 焊缝成形参数

复合热源焊缝成形可以用熔深、余高、表面铺展性来描述,如图 1 所示.



图 1 Nd:YAG 激光 + CMT 电弧复合热源平焊焊缝成形参数示意图

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铺展性的参数—余高-熔宽比,即用余高去除熔宽所得的商<sup>[7]</sup>.一般地,余高越小,熔宽越宽,焊缝“余高/熔宽”比越小,表明焊缝铺展性越好.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 光丝间距对焊缝成形的影响

光丝间距指的是激光焦点中心相对于焊丝与工件表面接触点的水平距离.

图 2 是激光功率为  $P_L = 2\text{kW}$ 、离焦量  $\Delta z = 3\text{mm}$  (定义焦点位于工件表面上方为正离焦,焦点位于工件表面下方为负离焦)、焊接电流  $I = 150\text{A}$ 、焊接速度为  $V_H = 0.6\text{m/min}$ ,YAG + CMT 复合热源平焊焊缝表面成形参数随光丝间距的变化.

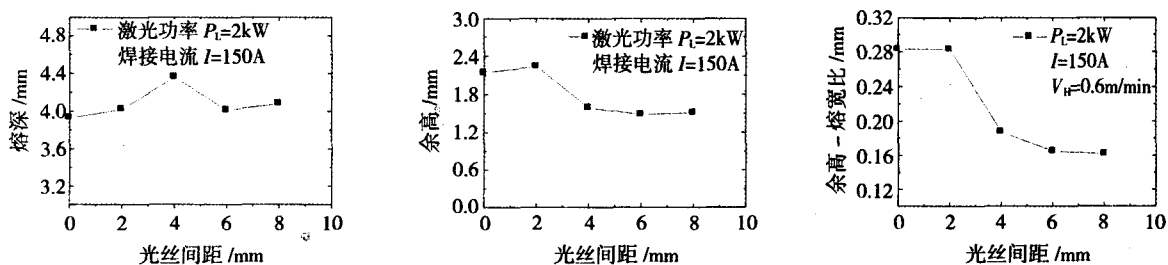


图 2 YAG 激光 + CMT 电弧复合热源平焊焊缝的成形参数随光丝间距的变化

如图3所示,焊缝熔深随光丝间距的变化不大,当光丝间距  $D_{LA} = 4\text{mm}$  时,激光和电弧之间的耦合作用最佳,熔深达到最大值  $4.36\text{mm}$ ,当光丝间距  $D_{LA} < 4\text{mm}$  时,电弧等离子体对激光产生了屏蔽、折射和吸收作用,导致激光能量散失,熔深变浅;当光丝间距  $D_{LA} > 4\text{mm}$  时激光和电弧之间耦合作用逐渐变弱,熔深变浅.说明在其它焊接工艺参数不变时,有一个与之相匹配的光丝间距值,使得焊缝熔深达到最大值;

焊缝余高随光丝间距增加而减小,当光丝间距  $D_{LA} > 4\text{mm}$  以后,余高变化趋于稳定;焊缝的余高-熔宽比受光丝间距的影响显著,余高-熔宽比随光丝间距的增加而减小,说明采用大的光丝间距能有效的降低焊缝的余高-熔宽比,即有利于焊缝金属

的铺展.

图3(a)为光丝间距  $D_{LA} = 0\text{mm}$  时,复合焊焊缝横断面形貌,图3(b)、(c)、(d)、(e)光丝间距分别为  $2、4、6、8\text{mm}$  时的复合焊焊缝横断面形貌.

如图3所示,当光丝间距  $D_{LA} \geq 4\text{mm}$  时,复合焊焊缝横断面形貌中,YAG焊焊缝横断面和CMT焊焊缝横断面有明显的分界线.这是因为随着光丝间距的增大,YAG和CMT分别作用到了不同的熔池,形成了两个温度场,产生了YAG熔池和CMT熔池机械式的叠加,使得YAG和CMT的失去了耦合作用.在实际焊接中,为了获得大的熔深和良好的焊缝金属的铺展性,而选择大的光丝间距,但要注意尽量避免产生YAG熔池和CMT熔池机械式的叠加.



图3 光丝间距对焊缝成形的影响

图3所示,当光丝间距  $D_{LA} \geq 6\text{mm}$  时,YAG焊焊缝横断面和CMT焊焊缝横断面在垂直方向上发生了错位,影响了复合焊焊缝成形,这是因为在实际焊接中,发生了Laser与丝错位,光丝间距  $D_{LA} < 6\text{mm}$  时,激光对电弧具有吸引作用,弥补了Laser与丝错位对复合焊焊缝成形的负面影响,而光丝间距  $D_{LA} \geq 6\text{mm}$  时,激光对电弧失去了吸引作用,产生了YAG

焊焊缝横断面和CMT焊焊缝横断面在垂直方向上发生了错位.

2.2 激光功率对焊缝成形的影响

图4是焊接速度为  $V_H = 0.6\text{m/min}$ 、离焦量  $\Delta z = 3\text{mm}$ 、光丝间距  $D_{LA} = 3\text{mm}$ ,不同焊接电流下激光功率对YAG+CMT复合热源平焊焊缝成形参数的影响.

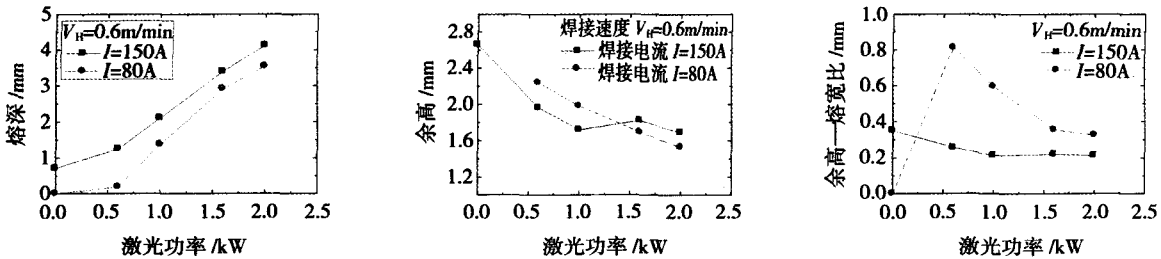


图4 YAG激光+CMT电弧复合热源平焊焊缝的成形参数随激光功率的变化

如图4所示,两种电流状态下,激光功率对焊缝的熔深和余高影响都很显著,熔深随激光功率的增加而增大,余高随激光功率的增加而减少,这是因为当激光功率较小时,复合焊接中的激光焊接呈现热传导焊的特点,这时的熔深有MAG电弧焊决定,所以形成的熔深比较小;而当激光功率达到金属材料汽化所需的功率密度时,激光焊接表现为深熔焊的特点,此时的熔深取决于激光焊接的熔深,所以激光

功率越大,熔深越大.激光功率的增大提高了焊接热输入,改善了熔敷金属的铺展性,所以激光功率越大,余高越小.说明采用大的激光功率,能有效的增加焊缝熔深和减少焊缝余高.

焊接电流  $I = 80\text{A}$  时激光功率对焊缝的余高-熔宽比影响比焊接电流  $I = 150\text{A}$  时要明显,这是因为小电流时,激光功率相对CMT电弧功率要大得多,对复合焊起主要作用,激光功率的变化对焊接热

输入影响较大,改善了熔敷金属的铺展性,即对焊缝的余高-熔宽比影响明显;大电流时,CMT对复合焊起主要作用,激光功率的变化对焊接热输入影响不大,对焊缝的余高-熔宽比影响不明显.说明在大的电流下,激光功率对焊缝金属的铺展性影响不显

著,在小的焊接电流下,增大激光功率可以有效改善焊缝金属的铺展性.

图5(a)为CMT焊时,焊缝横断面形貌,图5(b)、(c)、(d)、(e)激光功率分别为0.6kW、1.0kW、1.6kW、2.0kW时的复合焊缝横断面形貌.

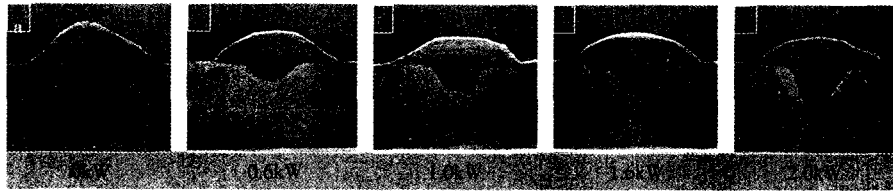


图5 激光功率对焊缝成形的影响(CMT电流150A)

如图5所示,激光功率 $P_L < 1.0\text{kW}$ 时,激光处于热导焊状态,辅助CMT电弧来增加焊缝熔深,焊缝横断面形貌同CMT焊缝形貌;激光功率 $P_L \geq 1.0\text{kW}$ 时,激光处于深熔焊状态,激光对焊缝熔深起主要作用,焊缝横断面形貌属于典型的复合焊形貌.图5(d)所示,当激光功率 $P_L > 1.0\text{kW}$ 处于深熔焊状态,但小于2.0kW时,产生了YAG焊缝横断面和CMT焊缝横断面在垂直方向上发生

了错位,结合上文2.1内容,说明大功率激光同样可以弥补了Laser与丝错位对复合焊缝成形的负面影响.

2.3 焊接电流对焊缝成形的影响

图6是激光功率 $P_L = 2\text{kW}$ 、离焦量 $\Delta z = 3\text{mm}$ 、焊接速度 $V_H = 0.6\text{m/min}$ 、光纤间距 $D_{LA} = 3\text{mm}$ 下焊接电流对YAG+CMT复合热源平焊焊缝成形参数的影响.

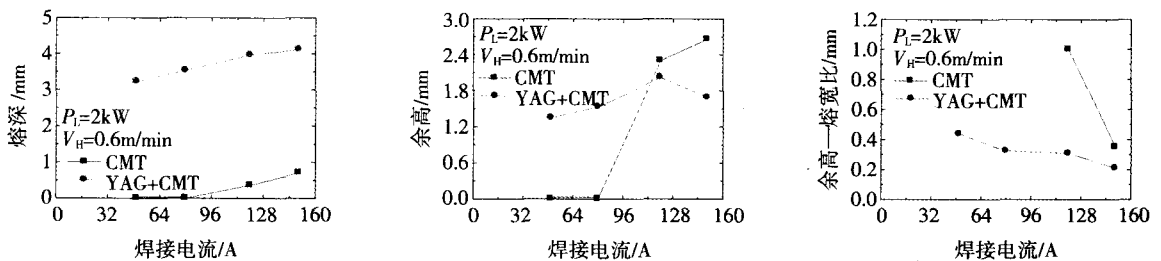


图6 YAG激光+CMT电弧复合热源平焊焊缝的成形参数随焊接电流的变化

如图6所示,随着焊接电流的增加,单独CMT和YAG+CMT复合热源焊接的熔深增大,但其熔深变化并不显著,这是因为此时激光属于深熔焊,而CMT因其自身特性熔深小,所以焊接电流的变化对熔深影响很小,说明YAG+CMT复合热源焊接中激光对焊缝熔深起主要作用;单独CMT和YAG+CMT复合热源焊接焊缝的余高随电弧功率的增加而增大,且变化明显,这是因为焊接电流的增加,增加了焊丝在单位长度母材上的熔覆金属量,焊缝余高增大,说明YAG+CMT复合热源焊接中CMT余高起主要作用.

进一步增加焊接热输入,使得焊缝金属的铺展性好于单独CMT.说明在CMT焊接过程中加入一定功率的Nd:YAG激光能够有效改善焊缝金属的铺展性.

图7为激光功率 $P_L = 2.0\text{kW}$ ,焊接电流 $I = 50\text{A}$ ,焊接速度 $V_H = 0.6\text{m/min}$ 时,CMT和YAG+CMT复合热源焊缝的外观形貌.

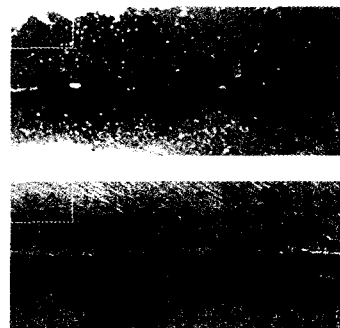


图7 单独CMT和YAG+CMT复合热源焊缝的外观形貌

单独CMT和YAG+CMT复合热源焊接的余高-熔宽比都随焊接电流的增加而减小,且YAG+CMT复合热源焊接的余高-熔宽比比单独CMT小,这是由于CMT焊接时,电流的增大,增加了焊接热输入,改善了焊缝金属的铺展性,同时激光的加入

从图7可见,单独 CMT 时,焊缝不连续,无法成形,而加入激光后,焊缝变得连续.说明在 CMT 焊接过程中加入一定功率的 Nd:YAG 激光能有效的稳定电弧和改善焊缝成形.这是因为小的焊接电流在高速焊接时因为电极与焊件之间等离子体浓度不够不能维持电弧稳定燃烧,加入激光以后,一是激光为电弧的燃烧提供了带电粒子和低电离电势的粒子;二是电弧中心与周围环境的温差增大,两者都使电弧经过该路径时的电阻变低,从而使维持电弧燃烧时的电压减小,所以复合热源的电弧能够稳定燃烧,

改善焊缝成形.

## 2.4 离焦量对焊缝成形的影响

离焦量是指激光焦点在光路方向上偏离工件上表面的距离,离焦量的变化改变了照射到工件表面的激光功率密度和激光焦点的位置.离焦量分为两种:一种是焦点位于工件表面上方为正离焦;另一种是焦点位于工件表面下方为负离焦.

图8是激光功率  $P_L = 2\text{kW}$ 、光丝间距  $D_{LA} = 3\text{mm}$ , YAG + CMT 复合热源平焊焊缝成形参数随离焦量的变化.

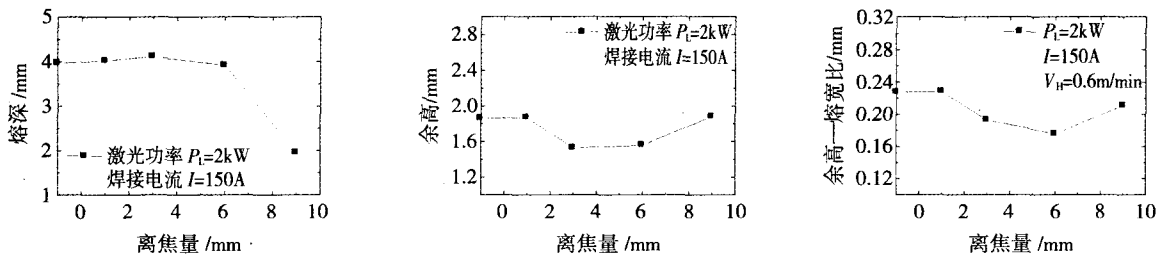


图8 YAG 激光 + CMT 电弧复合热源平焊焊缝的成形参数随离焦量的变化

如图8所示,离焦量的变化对焊缝对熔深影响明显,当离焦量  $\Delta z = 3\text{mm}$  时,焊缝熔深达到最大值  $4.12\text{mm}$ ;离焦量的变化对焊缝余高影响不明显,当离焦量  $\Delta z = 3\text{mm}$  时,焊缝余高达到最小值  $1.53\text{mm}$ ;余高-熔宽比受离焦量变化的影响不大,当离焦量  $\Delta z = 6\text{mm}$  时,余高-熔宽比达到最小值,焊缝金属的铺展性最好;以上说明采取适当的离焦量能有效提高焊缝的熔深,而对改善焊缝金属铺展性作用很小.

## 3 结 语

1) YAG + CMT 复合热源焊接中,激光对复合焊缝熔深起主要作用,CMT 对复合焊缝余高起主要作用;光丝间距和激光功率对复合焊缝横断面影响明显,离焦量对焊缝金属铺展性的影响很小.

2) YAG + CMT 复合热源与 CMT 相对比,能够更加稳定电弧,增加熔深,改善焊缝成形.

## 参 考 文 献:

- [1] 刘继常,李力钧. 激光复合焊接的探讨[J]. 焊接技术, 2002, 31(4): 6-8.
- [2] 王治宇,王春明,胡伦骥,激光-电弧复合焊接的应用[J]. 电焊机, 2006, 36(2): 38-41.
- [3] 陈彦宾,陈杰,李俐群,等. 激光与电弧相互作用时的电弧形态及焊缝特征[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 55-60.
- [4] 崔旭明,李刘合,张彦华. 激光-电弧复合热源焊接[J]. 工业与新技术, 2003, 32(2): 19-21.
- [5] 雷振,秦国梁,林尚扬,等. 激光与 MIG/MAG 复合热源焊接工艺发展概况[J]. 焊接, 2005(9): 9-12.
- [6] 雷振,林尚扬,王旭友. 激光-数字化精确控制短路过渡电弧复合热源焊接技术——一种可取代 TIG 填丝焊的高效[J]. 焊接, 2009(5): 23-26.
- [7] 秦国梁,雷振. Nd:YAG 激光 + 脉冲 MAG 电弧复合热源焊接工艺参数对焊缝表面成形的影响[J]. 应用激光, 2006, 26(2): 97-100.

(编辑:王萍)