

- [14] Tang X P, Buseh R, Johnson W L, et al. Slow atomic motion in Zr - Ti - Cu - Ni - Be metallic glasses studied by NMR [J]. Physical Review Letters, 1998, 81(24): 5358 - 5361.
- [15] Tang X P, Ulrich G, Buseh R, et al. Diffusion mechanisms in metallic supercooled liquids and glasses [J]. Nature, 1999, 402(11): 160 - 162.
- [16] 汪卫华, 王文魁. 新型多组元大块非晶合金材料的发现与研究进展[J]. 物理, 1998, 27(7): 398 - 403.
- [17] 朱庆军. Fe 基非晶 - 纳米晶激光熔覆涂层研究 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [18] 钟敏霖, 刘文今, 任家烈, 等. FeCSiB 合金连续激光非晶化的研究[J]. 金属热处理学报, 1998, 19(1): 42 - 47.
- [19] Bergmann H W, Mordike B L. Laser and electron - beam melted amorphous layers[J]. Journal of Materials Science, 1981, 16: 863 - 869.
- [20] 郑启光, 辜建辉, 王 涛, 等. 激光上釉非晶层的组织构成研究[J]. 中国激光, 1993, A20(10): 773.

作者简介: 张培磊, 1981 年出生, 博士研究生。现主要从事电子束、激光表面改性研究, 已发表论文 10 余篇。

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 填丝焊的高效焊接新方法

机械科学研究院哈尔滨焊接研究所(150080) 雷 振 林尚扬 王旭友 杜 兵 王 威

摘要 提出了激光 - 数字化精确控制短路过渡电弧复合热源焊接新方法。以 CMT(Cold Metal Transfer) 电弧焊和激光 - CMT 复合热源焊接为例, 利用 304 不锈钢平板堆焊, 对比分析了 CMT 电弧焊及激光 - CMT 电弧复合热源的焊缝成形特点, 研究了在采用纯 Ar 保护气体焊接 304 不锈钢时的激光 - CMT 电弧复合热源焊接过程稳定性、飞溅、焊缝成形特征、焊接效率及焊接接头的力学性能, 并将试验结果与 304 不锈钢 TIG 填丝焊进行对比。分析结果表明, 纯 Ar 保护激光 - CMT 复合热源焊接接头的综合力学性能与 TIG 填丝焊接头的综合力学性能相当, 但焊接效率可以提高 5 倍, 因此在不锈钢和镍基合金等高性能金属材料的焊接中, 用纯 Ar 保护的激光 - CMT 电弧复合热源焊接取代 TIG 填丝焊具有可行性。

关键词: 激光 CMT 电弧 复合热源焊接 304 不锈钢 纯氩保护气

中图分类号: TG457

0 前 言

数字化精确控制短路过渡电弧焊技术是在研究并解决 CO₂ 短路过渡的“飞溅”问题时提出的一种新型的波形控制短路过渡弧焊技术, 其中, 奥地利 FRONIUS 公司的“冷金属”过渡技术(Cold Metal Transfer, 简称 CMT)^[1] 和美国 LINCOLN 公司的表面张力过渡技术(Surface Tension Transfer, 简称 STT)^[2-5] 已经比较成熟, 并在焊接电源的生产中形成商品化。CO₂ 气体保护焊产生大量飞溅的原因主要在短路过渡发生

前, 在焊丝与熔池金属之间形成液态金属“小桥”后, 较大的短路电流流过逐渐变细的“小桥”, 由于产生大量的电阻热致使“小桥”被急剧加热, 过量的能量积累导致液态“小桥”汽化爆破, 引起飞溅。CMT 和 STT 弧焊技术减少飞溅的基本原理是相同的, 均是利用电弧本身作为传感器来检测电弧电压, 根据电压来判断熔滴过渡的瞬时形态, 从而根据检测到的电弧电压的变化来控制瞬时电弧电流的变化, 通过对短路电流的控制并借助于特定的外力作用实现熔滴过渡, 避免“小桥”汽化爆破而产生飞溅。但是, 二者在实现熔滴过渡瞬间所采用的处理方式不同, CMT 是通过焊枪中的送丝机构回抽焊丝来实现熔滴与电弧的分离, 熔滴在重力和惯性的作用下过渡到熔池; 而 STT 则主要是靠液态熔池

收稿日期: 2009 - 04 - 02

基金项目: 机械科学研究总院技术发展基金资助项目(20080601)

的表面张力作用拉断“小桥”完成熔滴的过渡。

数字化精确控制短路过渡电弧焊的最大优点在于焊接过程飞溅少、电弧稳定、焊接热输入相对较小,特别适合于薄板的焊接。但是,由于短路过渡前后的焊接电流受控,流经焊丝及熔滴的焊接电流较小,熔池温度相对较低,致使液态焊缝金属在母材表面的润湿性较差,得到的焊缝铺展性较差,焊缝余高大,特别是在厚板多层多道焊时,由于焊缝的铺展性不佳,易出现“未熔合”等缺陷。

文中针对数字化精确控制短路过渡电弧焊焊缝铺展性不佳的特点,提出了激光-数字化精确控制短路过渡电弧复合热源焊接新方法,并以 CMT 电弧焊和激

光-CMT 复合热源焊接 304 不锈钢为例,研究了其激光-CMT 电弧复合热源的焊缝成形特点,对比分析了 304 不锈钢 TIG 填丝焊及激光-CMT 电弧复合热源焊两种焊接方法的焊缝成形、焊接效率及其接头的综合力学性能。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验母材为 304 不锈钢板,试板规格为 200 mm × 100 mm × 8 mm,试验所用的焊丝为 $\phi 1.2$ mm 的 308L 不锈钢焊丝,母材及焊丝的化学成分见表 1,母材的力学性能见表 2。

表 1 母材及焊丝的化学成分(质量分数,%)

材料牌号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
304 不锈钢	0.022	0.47	1.70	0.015	0.024	18.69	8.96	—	—	余量
JE-308LSi	0.019	0.35	1.75	0.012	0.020	19.98	10.30	0.28	0.20	余量

表 2 304 不锈钢的力学性能

抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{el} /MPa	断后伸长率 A (%)	弯曲($d=3a, \alpha=180^\circ$)	冲击吸收能量 KV_2 /J(0℃)
650	282	36.5	合格	—

1.2 试验设备

试验所用激光器为额定功率 2 kW 的连续波 Nd:YAG 激光器,试验中采用焦距为 200 mm 的激光输出透镜;复合焊所用电弧焊机为奥地利 Fronius 公司生产的 TPS4000 型数字化 CMT 焊机;TIG 填丝焊所用焊机为 PANA-TIG SP300 钨极氩弧焊机。

1.3 试验方法

采用 Ar+2% CO₂ 保护气,分别在 304 不锈钢试板上进行 CMT 弧焊和激光-CMT 复合热源平板堆焊试验,焊后对比分析两种焊缝的熔深、熔宽及余高。采用纯 Ar 保护气体,进行 304 不锈钢激光-CMT 复合热源对接试验,观察焊接过程电弧的稳定性、焊接飞溅情况及其焊缝成形,并对焊接接头进行力学性能测试,将试验结果与 TIG 填丝焊接头的力学性能进行比较。对接接头性能试验采用 60° 的 V 形坡口。

2 试验结果及分析

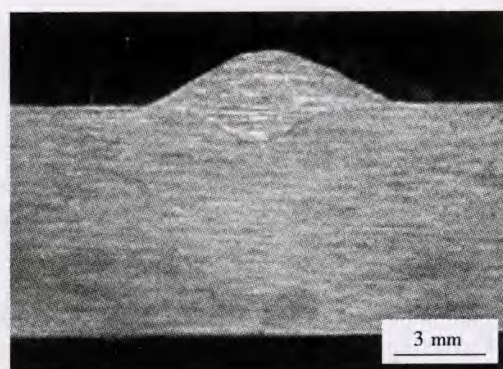
2.1 CMT 与激光-CMT 焊缝成形比较

图 1 是在其他焊接参数(焊接速度 0.8 m/min、焊

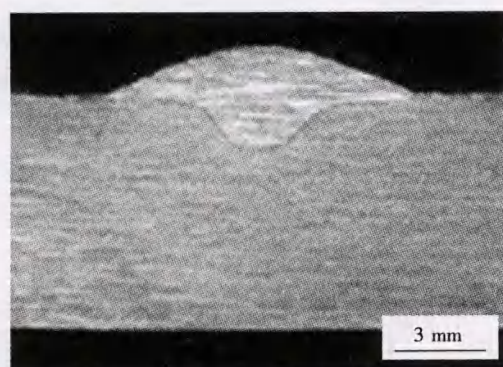
接电流 169 A、电弧电压 19 V)相同的条件下,得到的 304 不锈钢 CMT 和激光-CMT 复合热源平板堆焊焊缝成形,其中,在激光-CMT 复合热源焊接中与 CMT 电弧复合的激光功率为 1 000 W。通过对比图 1 中两焊缝的成形可以看出,在其他焊接条件均相同的情况下,CMT 电弧与一定功率的激光复合后,焊缝的熔宽明显增加。图 2 为两焊缝的焊缝横截面照片。对两焊缝的焊缝成形进行测量与分析,测量的主要焊缝成形参数见表 3。对比表 3 中的数据可以看出,与单独的 CMT



图 1 CMT 和激光-CMT 复合热源焊缝成形比较



(a) CMT



(b) 激光-CMT 复合

图2 CMT 焊缝和激光-CMT 复合焊缝横截面

表3 CMT 焊缝与激光-CMT 复合焊缝成形参数比较

焊接方法	熔深 h/mm	熔宽 b/mm	余高 r/mm	余高与熔宽比
CMT	1.28	4.72	1.68	0.36
激光-CMT 复合	1.60	7.68	1.36	0.18

弧焊焊缝相比,激光-CMT 复合热源焊缝的熔深和熔宽都增加,余高减小,其中熔深约增加 25%,熔宽约增加 63%,而余高约减小 19%。余高与熔宽比是一个更直观反映焊缝铺展性好坏的指标,该指标越小,表明焊缝铺展性越好^[6]。计算表明,单独 CMT 弧焊焊缝余高与熔宽比为 0.36,而激光-CMT 复合热源焊缝余高与熔宽比为 0.18,表明激光与 CMT 复合后可以很好地改善 CMT 弧焊焊缝的铺展性。

2.2 纯 Ar 保护的激光-CMT 复合焊缝成形

众所周知,采用熔化极气体保护焊焊接不锈钢、碳钢、合金钢等铁基金属时,为了增加电弧的刚性,减少电弧弧根的漂移,通常在工业纯 Ar 中加入一定量的氧

化性气体(如 CO_2 和 O_2 等),即所谓的 MAG 焊。尽管 MAG 焊焊接效率高,但是由于氧化性气体的加入,使得焊缝金属中 C 及 O 等杂质含量增加,焊缝的洁净程度降低,致使焊缝金属的塑、韧性降低;TIG 填丝焊,焊接过程稳定,焊接飞溅少,焊接过程采用惰性气体保护,焊缝金属洁净程度高,焊缝金属的塑性、韧性好,但是焊接效率低。尽管 TIG 填丝焊焊接效率低,但是长期以来在不锈钢、镍基合金等重要结构的焊接中难以被 MAG 焊取代的一个重要原因是 TIG 填丝焊过程稳定、飞溅少,且由于采用惰性气体保护,可使焊缝金属中的 C 和 O 含量保持在较低的水平,得到的焊缝金属塑韧性好。

CMT 电弧是数字化精确控制电弧,尽管与传统 MAG 焊相比,其电弧稳定性有了很大的提高,但是在焊接不锈钢等铁基金属时,仍需要采用含有氧化性气体的混合保护气。在激光-电弧复合热源焊接过程中,激光对电弧具有稳定、吸引和压缩作用,利用激光与电弧相互作用的这一原理,进行了 304 不锈钢纯 Ar 保护气体的激光-CMT 复合热源焊接探索性试验。

试验表明,在纯 Ar 保护气体下,激光-CMT 复合热源焊接过程稳定,焊接飞溅极少,焊缝成形美观,并且具有很好的可重复性。图 3 为纯 Ar 保护下的激光-CMT 复合热源焊缝成形照片。从图 3 可以看出,不但纯 Ar 保护的激光-CMT 复合热源焊缝具有非常美观的焊缝正面成形,而且还可实现单面焊双面成形。



(a) 焊缝正面成形



(b) 焊缝背面成形

图3 纯 Ar 保护的激光-CMT 复合热源焊缝成形

2.3 接头性能分析

将 304 不锈钢纯 Ar 保护的激光 - CMT 复合热源焊接接头进行力学性能测试,并将试验结果与 TIG 填丝焊接头的力学性能进行比较。两种焊接接头的力学性能试验结果见表 4。对表 4 的试验结果进行对比分析可以发现,304 不锈钢纯 Ar 保护的激光 - CMT 复合热源焊接接头的各项力学性能均达到或超过了 TIG 填丝焊接头的力学性能,因此,仅从焊接接头的力学性能方面来讲,纯 Ar 保护的激光 - CMT 复合热源焊接完全可以取代 TIG 填丝焊来实现 304 不锈钢的焊接。

2.4 焊接效率分析

表 5 为纯 Ar 保护的激光 - CMT 复合热源焊接和 TIG 填丝焊的主要焊接参数。对比表中的焊接参数可以看出,激光 - CMT 复合热源焊接的焊接速度和送丝速度均是 TIG 填丝焊的 5 倍多。也就是说,利用纯 Ar 保护的激光 - CMT 复合热源焊接 304 不锈钢,在保证焊接接头的综合力学性能不低于 TIG 填丝焊接头力学性能的同时,焊接效率可比 TIG 填丝焊提高 4 倍,因此仅从技术的先进性而言(不考虑设备投资成本),该项焊接技术若取代 TIG 填丝焊应用于焊接生产将是焊接技术的一次重大变革。

表 4 304 不锈钢焊接接头力学性能测试结果

焊接方法	抗拉强度 R_m /MPa	断裂位置	强度比(%)	弯曲(两件) ($d=3a, \alpha=180^\circ$)	0℃焊缝中心冲击吸收能量 KV ₂ /J(半试样)
TIG 填丝焊	$\frac{620,625}{622.5}$	焊缝	94	合格	$\frac{69,72,70}{70.3}$
激光 - CMT 复合 热源焊接	$\frac{645,640}{642.5}$	焊缝	97	合格	$\frac{70,70,70}{70}$

表 5 主要焊接参数

焊接方法	焊道	焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	送丝速度 $v_f/(m \cdot min^{-1})$	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V
TIG 填丝焊	4	0.11	1.2	140	10
激光 - CMT 复合 热源焊接	3	0.60	6.6	162	16.5

3 结 论

(1) 激光与 CMT 电弧复合可以改善 304 不锈钢 CMT 弧焊焊缝的成形,很好地解决单独 CMT 弧焊焊缝铺展性不佳的问题。

(2) 纯 Ar 保护的 304 不锈钢激光 - CMT 复合热源焊接过程稳定、几乎无飞溅,得到的焊缝成形美观,且易于实现单面焊双面成形;其焊接接头的综合力学性能与 304 不锈钢 TIG 填丝焊接头的综合力学性能相当,但前者的焊接效率是后者的 5 倍。

(3) 从焊接工艺稳定性、接头的综合性能及焊接效率等方面综合考虑,纯 Ar 保护的激光 - CMT 复合热源焊接取代 TIG 填丝焊是可行的。

参 考 文 献

[1] 杨修荣. 超薄板的 MIG/MAG 焊——CMT 冷金属过渡技术

[J]. 石油化工建,2006,28(2):37 - 39.

[2] 曾 君. STT 气体保护焊在全位置半自动焊中的应用[J]. 电焊机,2003,33(4):39 - 41.

[3] 王志坚,苗张木. 表面张力过渡焊在海洋工程建造中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2002,26(2):249 - 252.

[4] 蔡锌如. 一种新型高效的焊接技术——表面张力过渡技术[J]. 江西电力职工大学学报,2002,15(2):9 - 10.

[5] 单利涛. CCD 图像传感器及 STT 技术在水轮机焊接中的应用[J]. 电力建设,2005,26(3):69 - 73.

[6] 秦国梁,雷 振,林尚扬,等. Nd:YAG 激光 + 脉冲 MAG 复合热源焊接规范参数对焊缝表面成形的影响[J]. 应用激光,2006,26(2):97 - 100.

作者简介: 雷 振,1981 年出生,工学硕士,助理工程师。主要从事激光加工、激光 - 电弧复合热源焊接、异种金属焊接等方面的研究工作,已发表论文 18 篇,申报国家发明专利 6 项,获得省部级科技进步奖 1 项。