

# 不同 CMT 工艺 2014-T6 焊缝成形及气孔分析

从保强<sup>1</sup>, 欧阳瑞洁<sup>1</sup>, 乔柳平<sup>2\*</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

**摘 要:** 分别采用3种不同的冷金属过渡(CMT)焊接工艺进行2014-T6 铝合金平板堆焊成形,研究不同 CMT 工艺对铝合金焊缝成形特征及气孔的影响。结果表明,保持送丝速度 7.5 m/min、电弧长度和保护气体纯 Ar 流量 25 L/min 不变,2014-T6 铝合金常规 CMT 焊缝具有明显的指状熔深特征,焊缝气孔缺陷严重且呈全焊缝分布特征;脉冲 CMT(CMT-P)焊缝的指状熔深特征减缓,气孔显著减少,焊接速度 0.6 m/min 时焊缝基本无气孔;变极性复合脉冲 CMT(CMT-PADV)焊缝熔深仅约 0.4 mm,成形呈显著球形特征,气孔明显减少,焊接速度 0.4 m/min 时基本无气孔。

**关键词:** 铝合金; 冷金属过渡焊接技术; 焊缝成形; 气孔

**中图分类号:** TG 457.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)05-0037-04

## 0 序 言

冷金属过渡(cold metal transfer, CMT)焊接技术是 Fronius 公司开发出的一种新型焊接工艺,具有高熔敷效率、低热输入和无飞溅等特点<sup>[1]</sup>,在铝合金薄板以及异种金属连接方面具有独特优势而得到广泛关注,目前已有常规 CMT、脉冲 CMT(CMT pulse, CMT-P)、变极性 CMT(CMT advanced, CMT-ADV)和变极性复合脉冲 CMT(CMT pulse advanced, CMT-PADV)等控制模式。近年来国内外诸多学者将 CMT 技术用于铝合金薄板<sup>[2]</sup>、铝合金和钢<sup>[3]</sup>、铝合金和镁合金<sup>[4,5]</sup>等异种金属的焊接加工,取得了一定成果。在铝合金实际焊接加工时,焊缝成形对接头组织性能会产生重要影响,同时气孔也是主要焊接缺陷之一,严重影响了铝合金焊接质量。然而目前针对铝合金 CMT 焊缝的成形和气孔等方面的研究甚少,成形特征和气孔分布等方面尚不清楚,为此将3种不同 CMT 工艺用于铝合金焊接,试验研究其成形特征和气孔分布,研究结果为实现铝合金材料的高效高质量 CMT 焊接加工奠定基础。

## 1 试验方法

母材选用厚度 12 mm 2014-T6 铝合金平板,规格 200 mm × 160 mm,焊丝选用 ESAB 公司生产直径

1.2 mm ER4043,主要合金成分如表 1 所列。试验前铝合金板先用丙酮擦拭再采用机械打磨方法去除表面氧化膜。图 1 为 CMT 焊接系统,主要由 Fronius CMT Advanced 4000 R 电源、ABB 机器人、供气及装夹系统等组成。采用常规 CMT, CMT-P 和 CMT-PADV 3 种工艺,送丝速度(wire feed speed) 7.5 m/min 不变,研究不同焊接速度  $v$  (welding speed) 时的焊缝成形及气孔分布。依据已有研究结果设计  $v$ ,如表 2 所列,其中焊接热输入(heat input)按照  $E = \eta \times (\sum U_i I_i) / v$  计算,电弧热效率  $\eta = 0.8^{[6,7]}$ 。图 2 为送丝速度 7.5 m/min 时不同 CMT 工艺的焊接电流  $I$  和电弧电压  $U$  波形。其它工艺参数是:焊枪导电嘴至铝合金板高度 15 mm, Ar(99.99%) 保护气体流量 25 L/min,焊缝长度 100 mm。

表 1 2014 和 ER4043 主要合金成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 2014 and ER4043

材料	Mn	Si	Cu	Fe	Mg	Al
2014	0.4~1.2	0.5~1.2	3.9~5.0	0.7	0.2~0.8	余量
4043	0.05	4.5~6.0	0.3	0.8	0.05	余量

表 2 不同 CMT 工艺焊接速度及热输入

Table 2 Different welding speed and heat input

	CMT	CMT-P	CMT-PADV
焊接速度 $v$ / 热输入 $E$ / (m·min <sup>-1</sup> ) (J·mm <sup>-1</sup> )	焊接速度 $v$ / 热输入 $E$ / (m·min <sup>-1</sup> ) (J·mm <sup>-1</sup> )	焊接速度 $v$ / 热输入 $E$ / (m·min <sup>-1</sup> ) (J·mm <sup>-1</sup> )	焊接速度 $v$ / 热输入 $E$ / (m·min <sup>-1</sup> ) (J·mm <sup>-1</sup> )
1	1.0 152.8	1.0 180.6	0.6 108.2
2	0.8 191.1	0.8 225.8	0.5 126.3
3	0.6 254.8	0.6 301.0	0.4 162.4

收稿日期: 2013-10-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

\* 参加研究工作的还有 Dr. Ding Jialuo (Cranfield University, UK)



图1 CMT焊接系统  
Fig. 1 CMT welding system

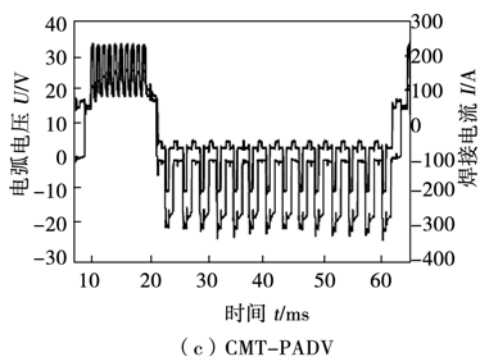
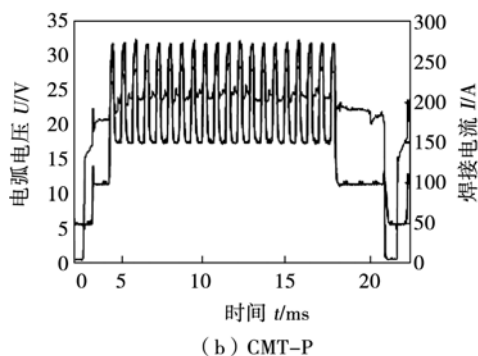
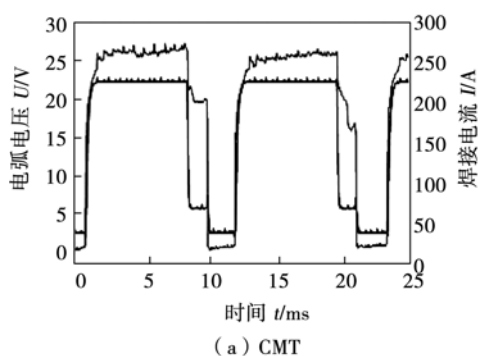
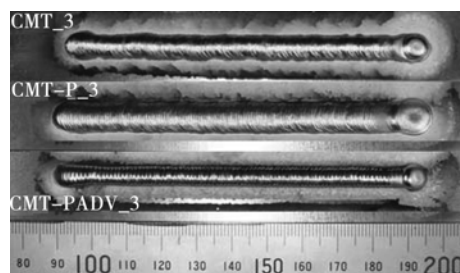


图2 不同CMT工艺焊接电流和电压波形(送丝速度7.5 m/min)

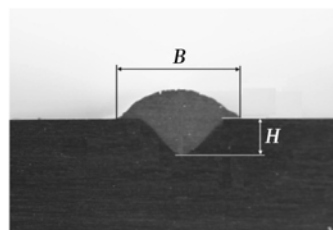
Fig. 2 Arc current and voltage waveforms of different CMT process

试验部分焊缝如图3a所示,在焊缝中部沿垂直 $v$ 方向切取横截面试样并抛光( $\text{SiO}_2$ 悬浮液),使用Axio Vision SE64软件测量熔深 $H$ 和熔宽 $B$ ,并计算焊缝熔透率 $R$  ( $R = H/B$ ),如图3b所示。沿平行于

焊接方向切取纵向截面试样并抛光( $\text{SiO}_2$ 悬浮液),在Nikon OPTIPHOT光学显微镜下观察焊缝气孔。



(a) 成形外观



(b) 成形参数示意图

图3 焊缝成形外观及参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of weld formation

## 2 试验结果与分析

### 2.1 焊缝成形

从图3a可以看出,3种CMT工艺均可获得满意的成形外观,表面光亮。图4为焊缝横截面,图5为CMT和CMT-P工艺试样焊缝 $B$ 、 $H$ 及 $R$ 随焊接速度 $v$ 的变化关系。与CMT和CMT-P工艺相比,CMT-PADV在低焊接速度( $v = 0.4 \sim 0.6$  m/min)时,热输入 $E$ 仍然很小,对应焊缝熔深 $H$ 仅约0.4 mm并呈球形外观,如图4c所示。如图4a,b所示,CMT焊缝熔池具有明显的指状特征并随 $v$ 的降低而有所减缓,CMT-P焊缝指状特征不显著,焊缝熔化宽度增加。CMT和CMT-P焊缝熔宽 $B$ 均随 $v$ 减小而增大,但CMT焊缝熔深 $H$ 基本不变(2.1~2.2 mm), $B$ 变化也不显著(7.2~8.1 mm),而CMT-P熔深 $H$ 由 $v = 1.0$  m/min时的1.7 mm增大至 $v = 0.6$  m/min时的2.4 mm,对应熔宽 $B$ 由6.8 mm增大至9.4 mm,使得 $v$ 较高时CMT焊缝的熔透率 $R$ 明显高于CMT-P焊缝,如图5b所示。

分析认为,与CMT工艺相比,保持送丝速度不变,CMT-P焊接过程中的脉冲作用可明显提高电弧的热功率,熔金属受热作用增强,液态金属在脉动力、表面张力等力作用下由熔池中心向熔池边缘的流动加剧,使得焊缝宽度明显增大,同时液态金属向下的流动较弱,导致熔池在深度方向上变化并不明

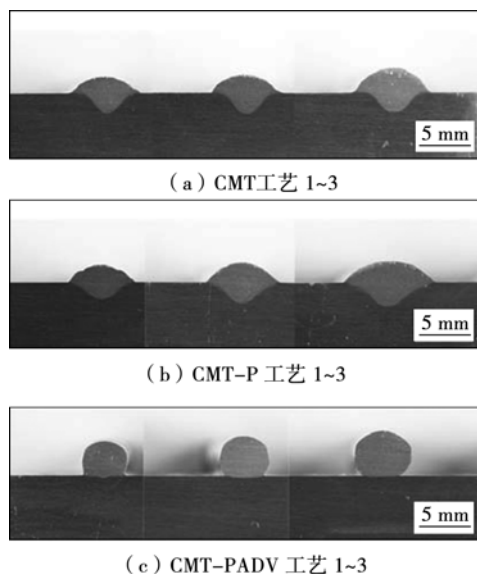


图4 不同 CMT 工艺焊缝横截面(从左至右 1~3)  
Fig. 4 Transverse section of weld joints of No. 1-No. 3

显,焊缝指状熔深特征不显著<sup>[8,9]</sup>.

## 2.2 焊缝气孔分析

图6为3种不同 CMT 工艺焊缝的纵向截面.可

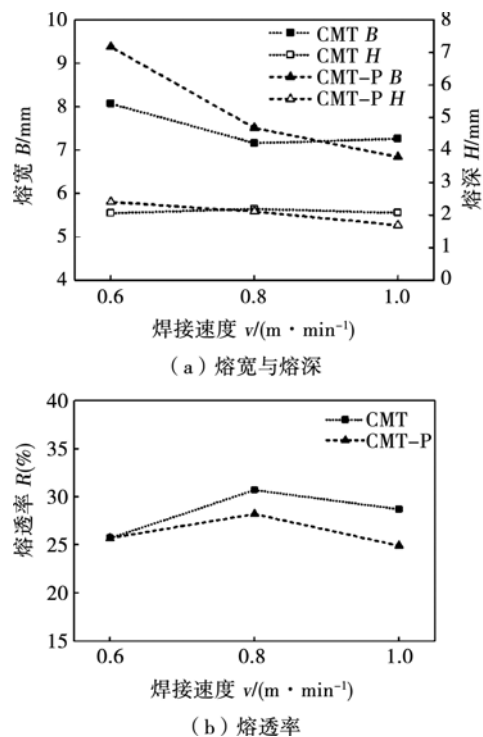


图5 不同 CMT 工艺对焊缝成形的影响  
Fig. 5 Effect of CMT process on weld formation

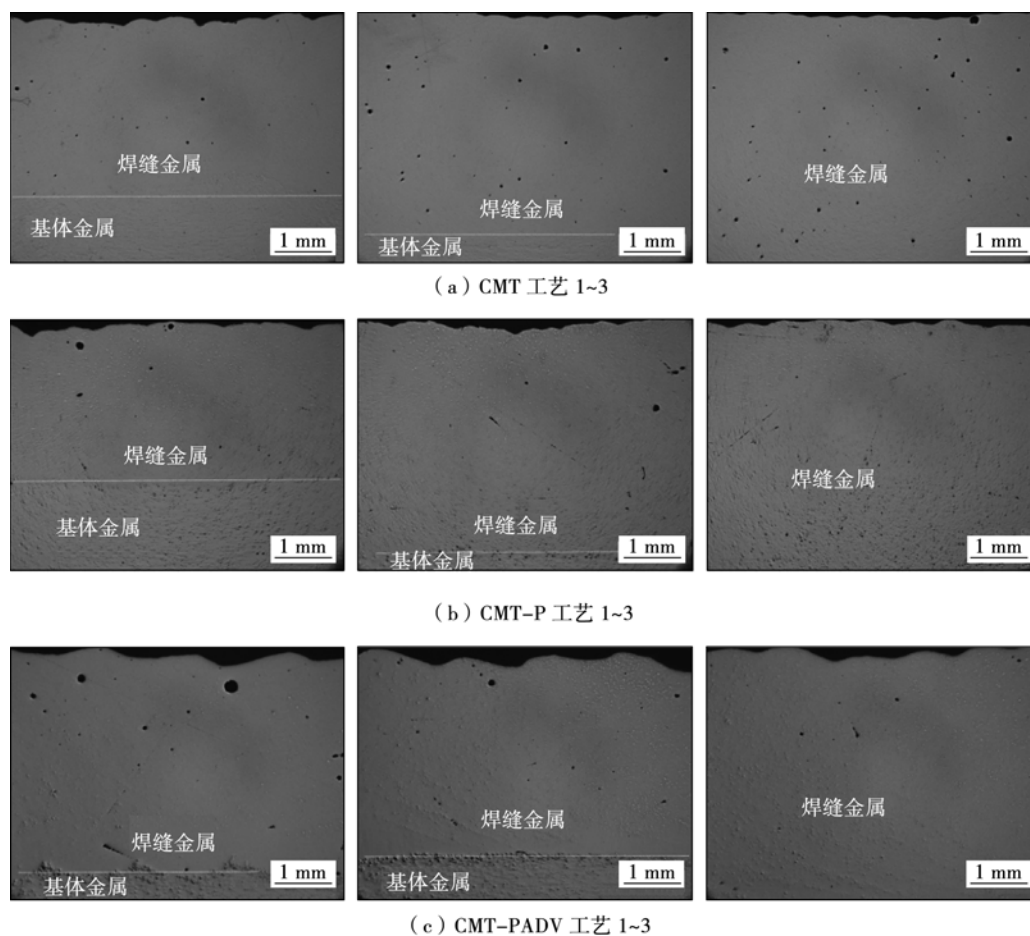


图6 不同 CMT 工艺焊缝纵向截面(从左至右 1~3)  
Fig. 6 Longitudinal section of weld joints with different CMT process No. 1-No. 3

以明显看出,采用常规 CMT 工艺时,焊缝底部和顶部均存在一定数量直径达  $50\ \mu\text{m}$  以上的气孔,且随着焊接速度的提高,气孔数量呈现减少的趋势。相对地,采用 CMT-P 和 CMT-PADV 工艺时,焊缝内气孔数量显著减少,且焊缝底部基本无气孔,当焊接速度较高时(CMT-P 工艺: $v=0.8\ \text{m/min}$  以上;CMT-PADV: $v=0.5\ \text{m/min}$  以上),在焊缝顶部仅存在几个较大尺寸气孔。

分析认为,对于常规 CMT 工艺,其焊缝具有明显的指状熔深特征,熔池熔化宽度窄,较高的热输入条件下极易形成气孔且不利于气孔溢出,从而在焊缝内形成大量气孔缺陷。与 CMT 和 CMT-P 工艺相比,一方面 CMT-PADV 电弧是一种交流电弧,对铝合金焊丝端部具有显著的氧化膜清理效果,如图 7 所示,被电弧清理后的焊丝形成熔滴进入熔池既有利于降低氢含量也有助于氢气孔的溢出,另一方面 CMT-PADV 工艺的热输入最小(表 2),低热输入有利于焊缝组织细化,从而有助于减少气孔,但当焊接热输入过低时(CMT-PADV\_No. 3,  $v=0.6\ \text{m/min}$ ,  $E=108.2\ \text{J/mm}$ )将不利于气孔溢出从而形成一定数量的气孔缺陷,如图 6c 所示。与 CMT 工艺相比,一方面如 2.1 所述 CMT-P 焊缝的指状熔深特征减缓,熔池宽度增加而有利于气孔的溢出,另一方面脉冲电流的加入可进一步增强熔池液态金属的流动性,尽管相同  $v$  时 CMT-P 工艺的热输入更高,但气孔数量仍得到显著减少,适当降低  $v$  时可消除气孔缺陷。

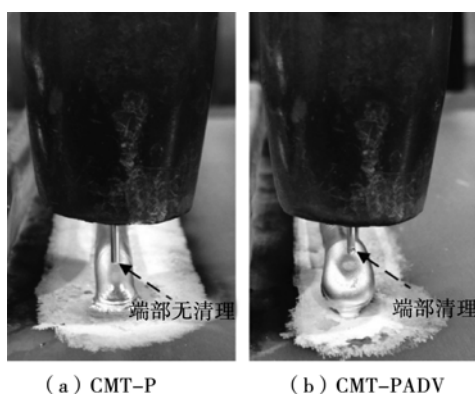


图 7 不同 CMT 工艺下 Al-5Si 焊丝端部状态

Fig. 7 Al-5Si filler wire ends with different CMT process

### 3 结 论

(1) 2014-T6 铝合金常规 CMT 焊缝具有明显的指状熔深特征,焊缝气孔缺陷严重且呈全焊缝分布特征。

(2) 2014-T6 铝合金 CMT-P 焊缝成形指状熔深特征减缓,气孔显著减少。送丝速度为  $7.5\ \text{m/min}$  和  $0.6\ \text{m/min}$  时焊缝基本无气孔。

(3) 2014-T6 铝合金 CMT-PADV 焊缝熔深小,焊缝金属具有显著球形特征,气孔明显减少。送丝速度为  $7.5\ \text{m/min}$  和  $0.4\ \text{m/min}$  时焊缝基本无气孔。

### 参考文献:

- [1] Pickin C G, Young K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(5): 583–585.
- [2] Feng Jicai, Zhang Hongtao, He Peng. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding[J]. Materials and Design, 2009, 30(5): 1850–1852.
- [3] Zhang Hongtao, Feng Jicai, He Peng, *et al.* The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 499: 111–113.
- [4] Shang Jing, Wang Kehong, Zhou Qi, *et al.* Microstructure characteristics and mechanical properties of cold metal transfer welding Mg/Al dissimilar metals[J]. Materials and Design, 2012, 34: 559–565.
- [5] Cao R, Wen B F, Chen J H, *et al.* Cold metal transfer joining of magnesium AZ31B-to-aluminum A6061-T6[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 560: 256–266.
- [6] Pépe N, Egerland S, Colegrove P A, *et al.* Measuring the process efficiency of controlled gas metal arc welding processes[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(5): 412–417.
- [7] Dupont J N, Marder A R. Thermal efficiency of arc welding processes[J]. Welding Journal, 1995, 74(12): 406s–416s.
- [8] Kou S, Wang Y H. Weld pool convection and its effect[J]. Welding Journal, 1986, 65(3): 63s–70s.
- [9] Lin M L, Eagar T W. Influence of arc pressure on weld pool geometry[J]. Welding Journal, 1985, 64(6): 162s–169s.

**作者简介:** 从保强,男,1979 年出生,讲师。主要研究方向为新型弧焊技术及电弧物理等。发表论文 50 余篇。Email: cong bq@buaa.edu.cn