

# 气化冲击焊飞板碰撞速度测量及影响因素分析

陈树君<sup>1</sup>, 苏珊<sup>1</sup>, 肖珺<sup>1</sup>, 毛羽<sup>2</sup>, Anupam Vivik<sup>2</sup>, Glenn S. Daehn<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心, 北京 100124)

(2. The Ohio State University, Impulse Manufacturing Laboratory, Columbus, Ohio 43210, USA)

**摘要:** 气化冲击焊接技术可广泛用于难以焊接成形的钛、镁和铝等有色金属材料与钢材的连接。铝箔作为气化冲击焊接过程能量转换的载体, 它的工作效率对气化冲击焊接工艺起到至关重要的作用。分析了气化冲击焊接过程中能量转换的过程, 采用光子多普勒测速系统分析了 3 种不同厚度的铝箔在不同能量输入条件下铝箔的工作效率和对飞板与靶板碰撞速度的影响规律。结果表明, 当飞板与靶板间距(碰撞角度 5°)为 2.5 mm 时, 铝箔的气化能量是影响飞板与靶板碰撞速度的关键因素。通过碰撞速度的分析可以发现, 0.051 mm 铝箔在输入能量小于 3 kJ 时效率最高, 0.076 mm 铝箔在 3~6 kJ 效率最高, 6~12 kJ 时, 0.127 mm 的铝箔可以获得最佳效率。

**关键词:** 铝箔; 气化冲击焊; 光子多普勒测速; 能量转换; 碰撞速度

中图分类号: TG456.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)11-3439-05

随着科学技术的发展, 有色金属及其合金由于其独有的性能, 在运载工具中替代钢材的比例逐渐提高, 这对材料的连接技术提出了重大考验。异种材料的焊接由于材料的物理化学性能差异较大, 易形成脆性金属间化合物、不同熔点相的偏析及残余应力大<sup>[1]</sup>等问题。

广大科技工作者针对异种材料的焊接问题展开广泛研究。冯吉才<sup>[1]</sup>等提出采用过渡层金属、能量精确控制等方法, 利用真空电子束焊接技术实现了异种铝合金、镁合金、镍基合金的高效焊接接头。宋刚<sup>[2]</sup>等采用添加 Cu-Zn 过渡层的方法, 利用激光-电弧复合热源技术, 使界面过渡层反应温度低于镁合金的沸点, 实现了镁合金-钢的平均抗拉强度 203 MPa 焊接接头。除采用高能束、复合热源等方法外, 搅拌摩擦焊<sup>[3]</sup>、爆炸焊<sup>[4]</sup>、扩散焊<sup>[5]</sup>、电磁脉冲焊<sup>[6]</sup>和 气化冲击焊<sup>[7]</sup>等新型固相焊接技术非常适于异种材料的焊接。

气化冲击焊接(Vaporizing Foil Actuators Welding, VFAW)是利用高压电容器组向铝箔或金属丝提供高能脉冲, 在 10~20 μs 时间内将铝箔或者金属丝气化产生一个冲击力, 工件(飞板)在冲击力的作用下高速(200~1 500 m/s)撞向另一工件(靶板), 从而实现焊接的一种新型固相焊接工艺。该技术可以实现铝合金、镁合金、钛合金等有色金属和钢铁材料同种及异种材料的焊接。该技术具有工艺简便、生产效率高、

接头无热影响区、接头界面结合强度高于母材等特点。

Vivik<sup>[7,8]</sup>等通过采用 VFAW 技术实现了铝-镁、铝-铜、铝-钛、铝-钢等异种金属材料的焊接工艺研究, 通过靶板压入凸起面的深度的方法得到了飞板与靶板在不同形状铝箔情况下碰撞力分布情况<sup>[9]</sup>, 对气化冲击焊接工艺的发展起到了至关重要的作用。

本研究通过光子多普勒测速(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)系统与电压、电流采集系统相结合的方法, 分析 VFAW 过程中能量的转换和铝箔厚度对飞板与靶板的碰撞速度的影响规律, 这对 VFAW 的工艺优化具有十分重要的意义。

## 1 实验

试验所用铝箔为 1100 纯铝, 厚度分别为 0.051 mm (2/1000 英寸), 0.076 mm (3/1000 英寸)和 0.127 mm (5/1000 英寸)。飞板材料为 5A06 铝合金, 其尺寸为 600 mm×800 mm×1.2 mm。为实现飞板的速度测量, 采用厚度为 5.6 mm 透明聚碳酸酯板代替靶板, 飞板与靶板采用玻璃纤维塑料板隔开, 两者间距用玻璃纤维板的厚度控制。

铝箔放置在贴有耐高温、高压绝缘层的固定座上, 铝箔两侧与电容器相连, 通过放电开关控制电容器的充放电过程。飞板放置在铝箔上侧, 铝箔与飞板使用柔性绝缘层隔离。飞板在铝箔爆炸产生的高速气流冲

收稿日期: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(51575012)

作者简介: 陈树君, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 北京工业大学, 北京 100124, 电话: 010-67391620, E-mail: sjchen@bjut.edu.cn

击作用下撞向靶板, PDV 探头利用固定座上的观测孔监测飞板的速度变化情况。

通过前期的研究发现, 决定 VFAW 效果有 2 个重要影响因素: 碰撞角度和碰撞速度<sup>[10]</sup>。为研究在固定的碰撞角度下, 能量输入对碰撞速度的影响规律, 将飞板与靶板间距固定为 2.5 mm, 即碰撞角度约 5°。试验设备为 MAGNEFORM-16, 最大放电能量 16 kJ, 其具体参数如表 1 所示, 能量与充电电压之间的关系可由以下公式计算。

$$U = \sqrt{\frac{E}{240}} \quad (1)$$

式中,  $U$  为系统充电电压, 单位为 kV,  $E$  为放电能量, 单位为 J。

采用 PDV 系统原理<sup>[9]</sup>。系统采用波长为 1550 nm 的激光器, 利用 1×4 分路器可实现 4 通道采集, 激光经过环形器后进入探头, 激光照射到高速移动的工件后反射至探头, 与环形器中的原始激光混合后由比较器对比频率的变化情况。

混合不同频率的 2 个正弦波会发生差频现象。其中 1 个正弦波具有激光的原始频率, 另 1 个波形具有多普勒频率后的频率。利用带宽足够高的信号采集系统可以收集两者频率信号, 分析差频信号后可得到物体的移动速度。

混合后的信号强度与时间的变化关系可以用式(2)表示。

$$I(t) = I_0 + I_d + \sqrt{I_0 I_d} \sin[f_b(t) + \phi] \quad (2)$$

式中,  $I_0$  是激光的原始强度,  $I_d$  是发生多普勒频移后的信号的强度,  $f_b$  是差频,  $\phi$  是两者之间的相位差。

式(2)中前两项  $I_0$  和  $I_d$  是总信号的 CW 分量, 第 3 项包含差频信息, 而差频是由多普勒频移后的信号与原始信号的频率差的绝对值得到, 可由以下公式表达。

$$f_b(t) = |f_d(t) - f_0| \quad (3)$$

式中,  $f_b(t)$  为差频,  $f_d(t)$  表示激光发生多普勒频率后的频率,  $f_0$  表示激光原始频率。

表 1 设备主要参数

Table 1 Capacitor bank characteristics

Capacitance/ μF	Inductance/ nH	Resistance/ mΩ	Maximum charging energy/kJ (8.16 kV)	Short circuit current rise time/μs
426	100	10	16	12

差频与速度的关系可以用以下公式表示:

$$f_b(t) = 2 \left[ \frac{v(t)}{c} \right] f_0 \quad (4)$$

式中,  $v(t)$  为飞板的移动速度,  $c$  为光速。

在本系统中所采用的激光波长为 1550 nm, 可得到原始频率为  $f_0 \approx 1.94 \times 10^5$  GHz。本系统信号采集系统采用 LeCroy 620Zi, 其带宽 2 GHz, 采用率 20 GS/s, 可推导出本系统可采集移动物体的速度小于 1500 m/s。

放电电压参数采集采用 TEKTRONIX 公司比例为 1 V:1000 V 的高压探头, 电流参数采集采用 Powertek 公司比例为 1 V:50 kA 感应线圈。采用 LeCroy620Zi 示波器同步采集 PDV 探头、电压和电流的数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 VFAW 铝箔放电能量转换

当电容器向铝箔放电时, 能量输入转化分为铝箔中部截面小的部位的瞬间气化需要的能量和气化后形成等离子体导通使铝箔继续气化 2 部分。

$$E_t = E_d + E_p \quad (5)$$

式中,  $E_t$  为能量输入转化为作用于飞板加速的总能量;  $E_d$  为铝箔中间区域瞬间气化的能量;  $E_p$  为铝箔气化后等离子体导通使铝箔继续气化的放电能量。

采用如下公式<sup>[11]</sup>可计算铝箔中间区域瞬间气化的能量  $E_d$ 。

$$E_d = \int_0^{t_b} I(t) \cdot V(t) dt \quad (6)$$

式中,  $t_b$  为铝箔气化时刻。

$$E_p = \int_{t_b}^{t_s} I(t) \cdot V(t) dt \quad (7)$$

式中,  $t_s$  为飞板与靶板碰撞时刻。

厚度为 0.072 mm 的铝箔在能量输入为 6 kJ 时的电流、电压及飞板的速度如图 1 所示。

由式(6)可以计算出, 在放电能量为 4、6 和 8 kJ 时, 铝箔气化能量  $E_d$  分别为 1.85、2.01 和 2.03 kJ。当输入能量从 4 kJ 增长到 6 kJ 时,  $E_d$  仅增加了 0.16 kJ, 当能量输入达到 8 kJ 时, 铝箔的气化能量并没有随着输入能量的增大而增大。从结果可以看出, 铝箔瞬间气化的能量  $E_d$  的值主要由铝箔气化瞬间的体积(铝箔中间区域的形状和厚度)决定, 当输入能量超过了铝箔的最佳工作能量范围, 能量的增长对铝箔瞬间气化能量的增长没有影响。

利用式(7)可计算出不同厚度的铝箔瞬时气化后在等离子体导通作用下持续气化的能量  $E_p$  为 0.52、0.9 和 0.9 kJ, 这部分能量可以使飞板持续加速, 由于

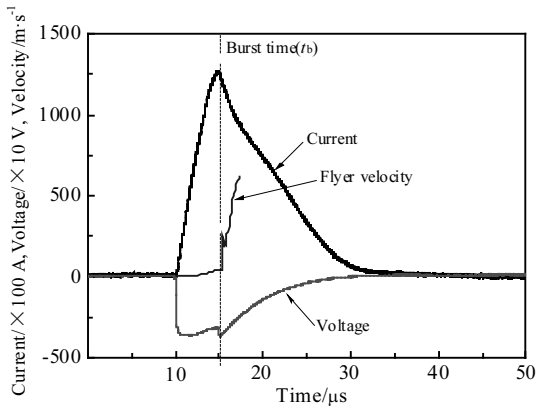


图 1 厚度 0.072 mm 铝箔在 6 kJ 的电流、电压及飞板速度  
Fig.1 Current, voltage and flyer velocity of 0.072 mm foil at 6 kJ of energy input

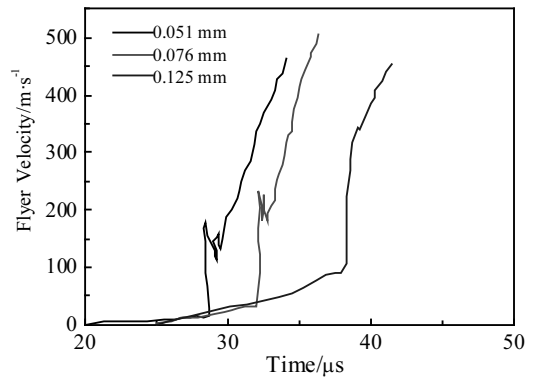


图 2 不同厚度铝箔驱动飞板在能量输入为 4 kJ 的飞行速度与时间的关系  
Fig.2 Flyer velocity vs time of foils with different thickness at 4 kJ

气化区域由铝箔的中间向两侧发展，能量分布的区域随着铝箔气化的进行逐渐往两侧扩展。当输入能量为 8 kJ 时，飞板与靶板的碰撞速度与 6 kJ 时的碰撞速度变化不大，仅增长 2%。

通过对飞板与靶板的碰撞速度分析，可以得出不同厚度铝箔的最佳能量输入范围。

### 2.2 铝箔厚度对飞板碰撞速度的影响

采用 PDV 系统分析在能量输入 4 kJ 时不同厚度铝箔在 2.5 mm 间距的飞行速度与时间关系如图 2 所示。

由飞板的飞行速度曲线可以看出，飞板的飞行过程的速度变化分 3 个阶段。第 1 阶段的加速驱动能量主要来自飞板的感应电流在铝箔的磁场作用下的电磁力，飞板的速度增长幅度不大，持续时间随着铝箔厚度的增加而加长。第 2 阶段在铝箔气化后产生的能量作用下，飞板获得一个较大的加速度，飞板在铝箔瞬间气化的冲击力作用下速度急剧上升。随着铝箔厚度的增加，气化所需要的能量增大，飞板获得的速度增长幅度也随之增大。铝箔瞬间气化后等离子体导通是驱动飞板飞行第 3 阶段的能量来源。铝箔瞬时气化后，等离子体导通使铝箔继续气化的能量密度远小于气化瞬间，从而使飞板的速度出现一个波动。飞板的变形和铝箔气化位置向两侧扩展使作用于 PDV 监测位置的能量比例逐渐减小，从而造成飞板在该区域的加速度逐渐减小。

在铝箔未气化前，飞板在厚度为 0.051、0.076 和 0.125 mm 的铝箔的电磁感应力的作用下分别获得 17、35 和 97 m/s 的速度，该速度的值随着铝箔厚度的增大而增加。

由于铝箔的厚度增加，铝箔中间部分的电阻减小，在能量输入相同情况下，电流从 90 kA 增加到 120 和 140 kA。铝箔通电到气化的时间从 9 μs 增加到 12 和 17 μs。由于电流增大，时间增长，从而使铝箔气化前飞板的速度随铝箔厚度的增加而增大。

3 种厚度的铝箔在 2.5 mm 间距下驱动飞板与靶板的碰撞速度随能量输入变化的影响如图 3 所示。

在能量输入为 2 kJ 时，厚度为 0.051 和 0.076 mm 的铝箔气化后使飞板分别加速到 452 和 426 m/s。0.125 mm 的铝箔驱动飞板的速度仅为 54 m/s，这是由于能量输入过低，不足以使厚度为 0.125 mm 铝箔发生气化现象，飞板在铝箔的电磁感应作用下产生了较小的变形。随着能量的增大，飞板与靶板的碰撞速度逐渐增大，当输入能量增加到 4 kJ 时，0.076 mm 的铝箔效率最高，飞板获得了 517 m/s 的速度。0.051、0.076 和 0.125 mm 的铝箔在能量输入在 6 kJ 时，飞板与靶板的碰撞速度分别为 550、628 和 611 m/s。在能量输入为 8~10 kJ 时，厚度为 0.076 mm 的铝箔驱动飞板的速度基本没有影响，而 0.125 mm 的铝箔驱动飞板速度从 611 m/s 增加到 1085 m/s。

从结果可以看出，铝箔在一定的间距（碰撞角度）情况下，当输入能量超过铝箔的最佳工作效率范围时，飞板与靶板的碰撞速度并不随能量的增大而增大。综合考虑 VFAW 的焊接工艺参数窗口，在一定的碰撞角度下，选择厚度恰当的铝箔更容易获得需要的碰撞速度，3 种厚度的铝箔在输入能量 2~12 kJ 下，飞板能获得 400~1100 m/s 的碰撞速度。

### 2.3 不同厚度铝箔放电效率

对 0.051、0.076 和 0.127 mm 厚度的铝箔在 2~12 kJ 范围内采用式(5)和式(6)计算铝箔瞬时气化能量  $E_d$  和铝箔气化后等离子体导通铝箔持续气化作用于飞板加速的能量  $E_p$ ，其结果如表 2 所示。

由结果可以看出，在能量输入相同的情况时，铝箔瞬时气化的能量  $E_d$  随着铝箔厚度的增大而增大。厚度相同铝箔的气化能  $E_d$  变化范围随能量输入的增大变化较小，这是由于铝箔瞬时气化的能量主要由铝箔的体积（铝箔的形状及厚度）决定，但随着能量输入的增大，通过铝箔的电流上升幅度也增大，时间减少从而导致铝箔气化的体积会有一定幅度的增加，从而造成相同厚度的铝箔的气化能量随着能量的增大发生小的变化。

由图 3、表 2 可以看出，铝箔瞬时气化的能量是决定飞板与靶板碰撞速度的核心因素。当能量输入为 2 kJ 时，0.051 和 0.076 mm 的铝箔驱动飞板碰撞速度

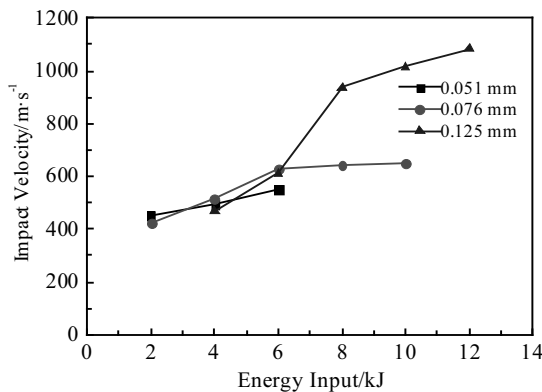


图 3 不同能量输入的飞板与靶板的撞击速度

Fig.3 Impact velocity of flyer and target with different energy inputs

表 2 不同厚度铝箔  $E_d$  和  $E_p$

Table 2  $E_d$  and  $E_p$  of different thickness foils

Energy input/ kJ	Thickness of foils/ mm	$E_d$ /kJ	$E_p$ /kJ
2	0.051	1.31	1.97
	0.076	1.59	1.95
	0.125	-	-
4	0.051	1.42	2.32
	0.076	1.85	2.37
	0.125	2.31	2.58
6	0.051	1.52	2.48
	0.076	2.01	2.91
	0.125	2.59	2.84
8	0.051	1.51	2.52
	0.076	2.03	2.93
	0.125	2.67	4.62
10	0.051	-	-
	0.076	2.08	2.93
	0.125	2.72	5.45
12	0.125	2.82	5.52

基本相同，0.051 mm 的铝箔瞬时气化能量  $E_d$  约占 65%，而 0.076 mm 的铝箔瞬时气化能量  $E_d$  约占 80%。当能量输入达到 4 kJ 时，3 种厚度的铝箔都发生了气化现象，0.076 mm 的铝箔瞬时气化驱动飞板获得的碰撞速度最大，瞬时气化能  $E_d$  所占总能量的 78%，厚度为 0.127 mm 的铝箔瞬时气化能量  $E_d$  占总体能量的 90%。驱动飞板的能量增大到一定程度后不再增加，铝箔瞬时气化能量  $E_d$  所占能量的比值随之降低。综合分析不同厚度的铝箔驱动飞板在不同能量下的速度分布和能量转换分析可知，在 2.5 mm 的间距条件下，铝箔瞬时气化能量  $E_d$  的大小是影响飞板的碰撞速度主要因素。在 VFAW 工艺过程中，在一定的碰撞角度前提下，选择合适厚度的铝箔在其最佳工作能量至关重要。因此，0.051 mm 的铝箔最佳工作能量小于 3 kJ, 0.076 mm 铝箔最佳工作能量为 3~6 kJ, 0.0125 mm 铝箔最佳工作能量为 6~12 kJ。

### 3 结 论

1) VFAW 工艺过程中，驱动飞板加速的能量主要由铝箔瞬时气化能  $E_d$  和气化后等离子体导通铝箔持续气化能量  $E_p$  提供。

2) 当输入能量超过铝箔瞬时气化所需要能量时，铝箔厚度和形状是决定飞板碰撞速度的关键因素。在 2.5 mm 的间距（碰撞角度为 5°）时，3 种厚度的铝箔在输入能量 2~12 kJ 下，飞板能够获得 400~1100 m/s 的碰撞速度。

3) 厚度不同的铝箔有最佳能量输入范围。0.051 mm 的铝箔最佳工作能量小于 3 kJ，0.076 mm 的铝箔最佳工作能量为 3~6 kJ，0.125 mm 的铝箔最佳工作范围为 6~12 kJ。

### 参考文献 References

[1] Feng Jicai(冯吉才), Wang Ting(王 廷), Zhang Binggang(张秉刚) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2009, 30(10): 108

[2] Song Gang(宋 刚), Wang Jie(王 杰), Yu Jingwei(于景威) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2016, 37(5): 69

[3] Xiang Qian(相 倩), Lü Nianchun(吕念春), Xue Peng(薛 鹏) *et al. Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2017, 53(20): 1

[4] Zhen Yuanmou(郑远谋). *Welding Technology*(焊接技术)[J], 2001, 30(5): 25

[5] Luan Yilin(栾亦琳), Gang Tie(钢 铁), Zhang Chi(张 弛). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J],

- 2016, 37(4): 35
- [6] Chen Shujun(陈树君), Xia Yu(夏羽), Yu Yang(于洋) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(2): 352
- [7] Brune R C, Hansen S R, Vivek A *et al.* *Journal of Materials of Processing Technology*[J], 2017, 248: 185
- [8] Hahn M, Weddeling C, Taber G *et al.* *Journal of Materials of Processing Technology*[J], 2016, 230: 8
- [9] Brune R C, Hansen S R, Vivek A *et al.* *Journal of Materials of Processing Technology*[J], 2017, 248: 185
- [10] Vivek A, Hansen S R, Daehn G S. *Review of Scientific Instruments*[J], 2014, 85: 075 101
- [11] Osher J E, Barnes G, Chau H H *et al.* *IEEE Transactions on Plasma Science*[J], 1989, 17(3): 392

## Flyer Impact Velocity in Vaporizing Foil Actuator Welding Process and Its Influencing Factors

Chen Shujun<sup>1</sup>, Su Shan<sup>1</sup>, Xiao Jun<sup>1</sup>, Mao Yu<sup>2</sup>, Anupam Vivik<sup>2</sup>, Glenn S. Daehn<sup>2</sup>

(1. Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Automotive Components, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. Impulse Manufacturing Laboratory, The Ohio State University, Columbus 43210, USA)

**Abstract:** Vaporizing Foil Actuator Welding (VFAW) has the promising potential to be widely used to join steel with non-ferrous metals, such as titanium, magnesium, and aluminum alloys. The working efficiency of aluminum foils used as the medium of energy transmission from electric energy to dynamic energy during VFAW process plays an important role in the welding technique. In this paper, the influence of the working efficiency of the aluminum foil on impact velocity between the flyer and target was explored by Photon Doppler Velocimetry (PDV) experiments. The experiments were carried out with foils of three different thicknesses under varied input energies. When the distance between the fly and target is 2.5 mm with the impact angle of 5°, the vaporization energy of the foil is the key factor of the impact velocity. According to the analysis of impact velocities, the 0.051 mm-thick aluminum foil has the best efficiency with the input energy of 3 kJ, 0.076 mm-thick aluminum foil works most efficiently with the input energy of 3 to 6 kJ, and with the input energy of 6 to 12 kJ, the 0.127 mm-thick aluminum foil has the highest working efficiency.

**Key words:** aluminum foils; vaporizing foil actuators welding; photonic Doppler velocimetry; energy conversion; impact velocity

---

Corresponding author: Su Shan, Candidate for Ph. D., Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, Tel: 0086-10-67391620, E-mail: sushans@foxmail.com