

高能脉冲精密冷焊的电弧特性和增材制造成形能力

焦文清¹, 韩红彪¹, 王磊², 陈俊潮¹, 王中豪¹

(1. 河南科技大学, 河南 洛阳 471003; 2. 河南省特种设备安全检测研究院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 进行了高能脉冲精密冷焊的电弧特性试验和各类零件的增材制造试验, 根据脉冲电流和电压波形分析了脉冲电弧的特性, 根据堆焊零件的成形情况分析了其增材制造成形能力。结果表明, 高能脉冲精密冷焊的输出电流为脉冲方波, 产生断续的脉冲电弧; 其脉冲时间短, 电弧能量密度高, 冷却时间长, 热输入小, 零件变形小; 在堆焊成形过程中, 工件处于冷态, 熔池存在时间短, 不会出现焊缝熔池流淌现象, 堆焊零件的成形精度高, 具有复杂零件的增材制造成形能力; 该方法可用于较小的几何形状复杂零件的增材制造, 也可用于精密零件的增材制造成形修复。

关键词: 精密冷焊; 电弧特性; 增材制造; 成形

中图分类号: TG403

0 前言

近年来, 增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 技术作为一种革命性的制造零件技术而得到迅速发展^[1-3]。早期国内外增材制造的研究主要针对于低熔点非金属材料, 例如塑料、树脂等, 并取得了显著的成果^[4-5], 但其产品的精度和性能无法满足现代制造业对产品的各种要求。因此, 金属增材制造技术成为各国科学研究的重点和制造业发展的新趋势。

针对金属增材制造技术, 根据热源的不同可分为激光、电子束、电弧增材制造技术三类, 原材料一般有金属粉末和焊丝两种形式^[5]。与激光增材制造、电子束增材制造相比, 电弧增材制造不会受到设备成本、设备成型缸和真空室的尺寸限制且制造效率高^[5]。但电弧增材制造在成形过程中由于过大的热输入容易造成零件变形、工件边缘塌陷、内部晶粒粗大及表面不良等问题从而影响零件的成形精度及内部质量^[6-8]。因此研究一种成形精度高、操作简单、低成本的增材制造技术十分必要。

高能脉冲精密冷焊技术具有热输入小、脉冲时间短、冷却速度快、控制精度高等优点, 可用于各种金

属的增材制造。文中主要研究其电弧特性及增材制造的成形能力。

1 高能脉冲精密冷焊的电弧特性

1.1 试验设备和方法

该试验采用 E-9188G6 型精密数字冷焊机作为焊接电源, 钨极直径为 1.5 mm, 其端头角度为 30°。工件材料为 20 mm × 20 mm × 1.5 mm 的 45 号钢板, 氩气流量 $Q = 10 \text{ L/min}$, 延气时间 5 s。

试验方案如图 1 所示。该焊机采用高频高压引弧 (频率 150 ~ 200 kHz, 电压 3 000 V 左右), 而且焊接脉冲时间短 (10 ~ 1 000 ms), 所以电流电压变化速度很快, 采用互感式或霍尔式传感器无法正确检测到信号, 故采用示波器高压探头直接测量电压和电流信号。测量焊接电流的分流器的输出接到 Tektronix 4000 型示波器的通道 1, 工件与焊枪之间的电弧电压信号连接到

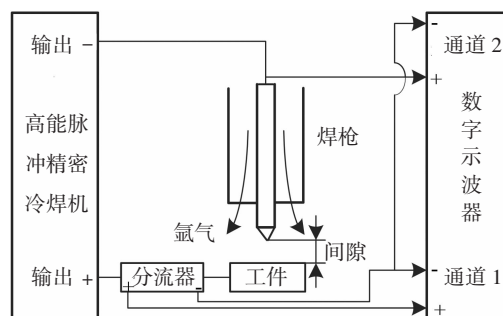


图1 试验方案图

收稿日期: 2018-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375146); 河南省高等学校重点科研项目(17A460012)。

doi: 10. 12073/j. hj. 20181126001

通道2。试验过程中脉冲电弧的电流、电压信号被示波器检测并储存,然后对采集的数据进行分析。

1.2 试验内容

采用上述方案进行高能脉冲精密冷焊试验,主要研究脉冲电流、脉冲时间、两极间的间隙对脉冲电弧电流、电压波形的影响,具体内容见表1。

表1 焊接参数

试验	脉冲电流 I_p/A	脉冲间隔时间 t_b/ms	钨极与工件之间的间隙 h/mm	脉冲时间 t_p/ms
1	50	1 000	0.5	50,100,200,300,500
2	1,2,4,6,8,10,20, 50,100,140,180	500	0.5	100
3	50	500	0.5,0.8,1.0,1.2,1.5,1.8,2.0	100

1.3 电弧的电流和电压波形分析

由试验1的结果可知,焊接电源输出近似脉冲方波的电流波形,产生的是断续电弧,即每个脉冲输出产生一个电弧,脉冲之间的间隔为熄弧冷却时间;每个脉冲电弧时间较短,而脉冲间隔时间较长,便于工件进行充分的冷却。

脉冲电流 $I_p=50\text{ A}$ 、脉冲时间 $t_p=50\text{ ms}$ 、脉冲间隔时间 $t_b=1\text{ 000 ms}$ 、两极间隙 $h=0.5\text{ mm}$ 时检测到脉冲电弧的电流和电压波形如图2所示。

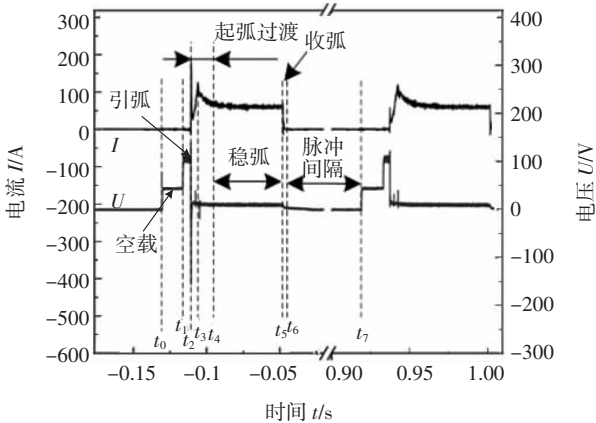


图2 脉冲电弧的电流和电压波形

t_0 时刻前为脉冲间隔阶段,电源没有任何输出,脉冲电流和电压均为零。 $t_0\sim t_1$ 之间为空载阶段,电源输出空载电压50 V左右,由于电极和基体之间的间隙尚未被击穿形成电弧,所以电流始终为零。 $t_1\sim t_2$ 之间为引弧阶段,电源接通引弧电路,输出高频高压引弧脉冲;在 t_2 时刻的高频高压脉冲将两极间隙中的氩气介质击穿,形成电弧,电流发生陡升而电压发生陡降。随后电弧电流迅速升高,在 t_3 时刻达到峰值130 A左右,

试验1:进行连续脉冲焊接试验,检测脉冲电流和电压波形,并分析其波形特征。

试验2:进行连续脉冲焊接试验,分析脉冲电弧的电压随电流的变化趋势。

试验3:进行连续脉冲焊接试验,分析电弧电压随两极间隙的变化规律。

然后电流逐渐降低,在 t_4 时刻稳定在50 A左右,所以 $t_2\sim t_4$ 之间为非稳态的起弧过渡阶段。在 $t_4\sim t_5$ 之间的电弧电压和电流比较稳定,即稳弧阶段。在 $t_5\sim t_6$ 之间为收弧阶段,电源停止输出,电流和电压迅速下降到零,电弧熄灭,放电通道中的带电粒子逐渐复合为中性粒子,为下次脉冲电弧放电做准备^[9]。 $t_6\sim t_7$ 之间为脉冲间隔阶段,电源没有输出,在 t_7 时刻重新开始下一个脉冲周期。

当逐渐增大脉冲时间 t_p 而其它参数不变时,稳弧时间随着设定值的增大而增大,而空载电压、起弧峰值电流、稳弧电流和稳弧电压、起弧过渡时间等波形参数基本不变。

1.4 稳态电弧的静特性

通过试验2可获得脉冲电弧在稳弧阶段中不同稳弧电流 I_w 所对应的稳弧电压 U_w ,即稳弧阶段脉冲电弧的静特性如图3所示。在电流较小时(1~10 A),稳弧电压随着稳弧电流的增加而下降,呈下降特性;在电流较大时(20~180 A),随着稳弧电流的增加,稳弧电压

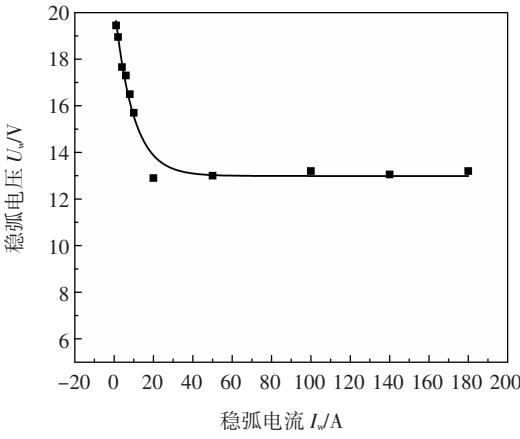


图3 稳弧阶段脉冲电弧的静特性

变化不大,呈等压特性^[10]。

由试验3的结果可获得脉冲电流为50 A时脉冲电弧稳弧阶段的稳弧电压随两极间隙的变化曲线,如图4所示。随着两极间隙的增大,稳弧电压基本上按线性比例逐渐增大,这说明两极之间的间隙决定了电弧电压的大小,但过大的两极间隙则无法击穿气体介质而形成电弧。

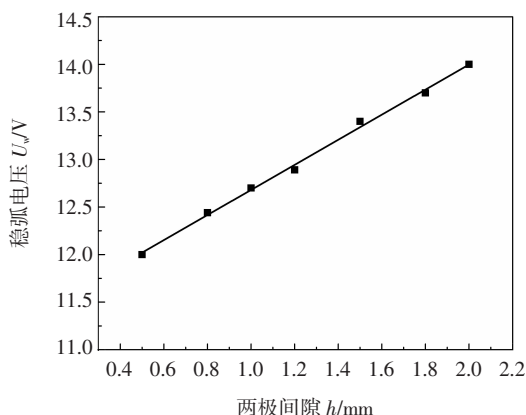


图4 稳弧电压随两极间隙的变化曲线

1.5 非稳态阶段的电弧特性

在起弧过渡阶段,电弧电压和电流变化剧烈,电流从零迅速上升到峰值电流 I_m ,电流上升速率 $D = I_m / (t_2 - t_1)$,电弧处于非稳态阶段。随着电弧的稳定,电流也下降趋于稳定的设定值 I_p 。这个阶段的峰值电流和较大的电流上升速率直接影响了起弧阶段电弧的能量密度和电弧力等,有利于快速加热并形成熔池。

由试验2可获得非稳态起弧过渡阶段的峰值电流、电流上升速率随脉冲电流的变化趋势,如图5所示。峰值电流随脉冲电流的增加基本上呈线性增大;

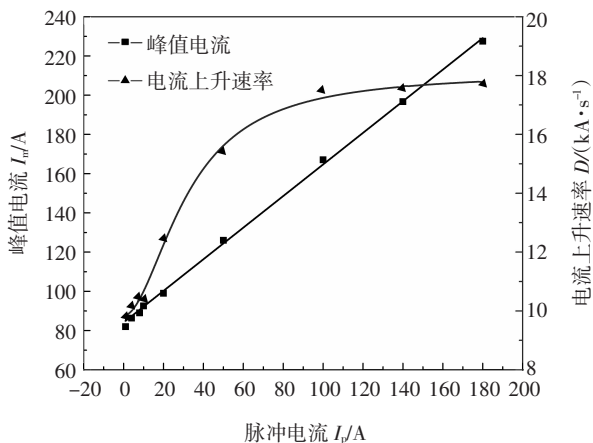


图5 非稳态起弧过渡阶段的峰值电流、电流上升速率随脉冲电流的变化趋势

在脉冲电流较小时,电流上升速率随脉冲电流的增大而基本上呈线性增大;当脉冲电流大于50 A时,电流变化率随脉冲电流变化的斜率逐渐减小,即随着脉冲电流的逐渐增大,电流变化率趋于17.7 kA/s并保持稳定。对试验结果统计对比后发现,峰值电流一般比脉冲电流大80 A左右。

通过以上试验可知,高能脉冲精密冷焊电源产生不连续的脉冲电弧,电流波形为脉冲方波,其脉冲电弧的时间短而冷却熄弧时间长,每次引弧时气体介质为冷态,由于热收缩效应而压缩电弧,再加上较大的电流上升速率和峰值电流,使电弧能量集中,高能脉冲瞬间可以使工件熔化并形成熔池;脉冲电流和脉冲时间的控制精确,有利于控制热输入和焊缝成形。利用该冷焊方法进行堆积成形时,由于其热输入小,基体一直处于冷态,熔池存在时间短,不会出现因热量聚集产生熔池流淌现象,从而保证了其成形能力。

2 高能脉冲精密冷焊的增材制造成形能力

采用1.5 mm厚的45钢板作为基板,选择焊丝型号为ER50-6的二氧化碳气体保护焊丝进行高能脉冲精密冷焊的增材制造成形试验。

2.1 单点垂直圆柱零件的堆焊成形

采用脉冲电流 $I_p = 70 \text{ A}$,脉冲时间 $t_p = 120 \text{ ms}$,间隔时间 $t_b = 1000 \text{ ms}$,焊丝直径为0.6 mm,堆积层数为25层,堆焊出高度为6 mm的单点垂直圆柱零件,如图6所示。该圆柱体的平均直径约为1.8 mm,焊缝尺寸均匀,相比于其它电弧增材制造技术,其焊缝尺寸小,焊缝成形精度较高^[11]。

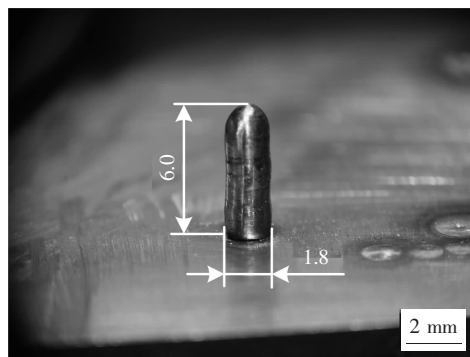
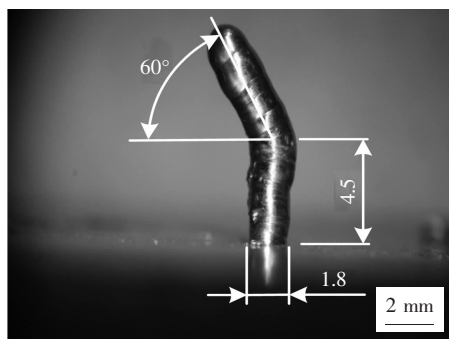


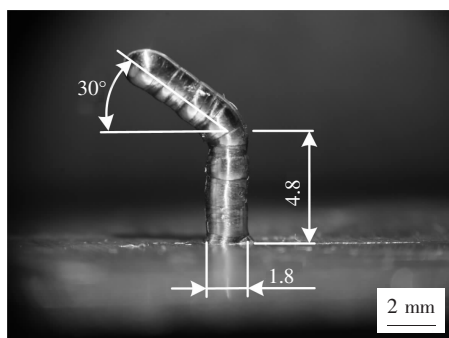
图6 圆柱零件

2.2 倾斜圆柱零件的堆焊成形

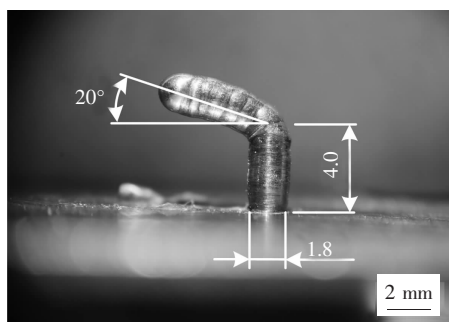
采用2.1中规范参数堆焊出倾斜圆柱零件如图7所示。在基板上预先堆积一定高度的圆柱体,焊枪在提升高度的同时向一侧移动一定的距离,逐点堆



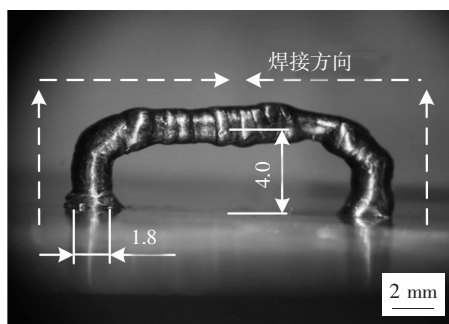
(a) 倾斜角 60°



(b) 倾斜角 30°



(c) 倾斜角 20°



(d) 倾斜角 0°

图7 倾斜圆柱零件

积成一定角度的倾斜圆柱零件。图 7a ~ 7d 的倾斜角分别为 60°, 30°, 20° 和 0°。由于脉冲时间只有 120 ms, 熔池存在时间很短, 冷却时间很长, 基体一直处于冷态, 所以不会出现焊缝塌陷或者熔池流淌

现象。由此可以看出, 该方法具有复杂零件的增材制造成形能力, 特别适合棱边、棱角的堆焊成形, 也能够实现在未加支撑的情况下实现各种倾斜角度零件的堆焊成形。

2.3 单道薄壁零件的堆焊成形

采用 2.1 中规范参数堆焊出单道薄壁零件如图 8 所示。焊枪水平直线移动, 由断续点焊缝形成长焊缝后, 随之调整焊枪的高度进行逐层堆积, 以此往复循环形成薄壁零件。该零件堆积 18 层, 长约 15.0 mm, 高约 4.9 mm, 宽约 1.4 mm。相比于其它电弧增材制造技术, 没有出现起弧端的凸起和收弧端的塌陷现象, 该零件两端焊缝成形质量一致, 焊缝表面比较平整^[12-13], 且零件基本没有变形。

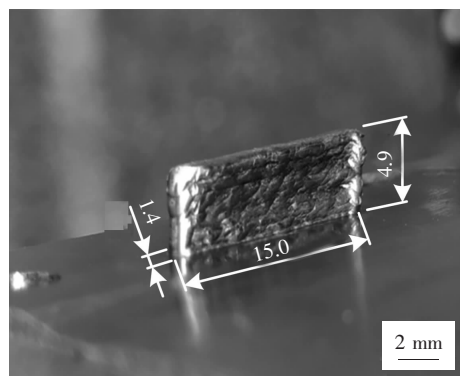


图8 单道薄壁零件

2.4 微形金字塔零件的堆焊成形

采用脉冲电流 $I_p = 120$ A, 脉冲时间 $t_p = 150$ ms, 间隔时间 $t_b = 1\ 000$ ms, 焊丝直径为 1.0 mm, 堆焊 20 层形成 10.0 mm × 10.0 mm × 9.7 mm 的金字塔, 如图 9 所示。该零件的焊缝比较均匀, 棱角分明, 成形精度高, 没有出现因热量聚集而产生零件变形和塌陷等问题, 说明该方法能够对热输入进行精确的控制, 适合零件的增材制造。

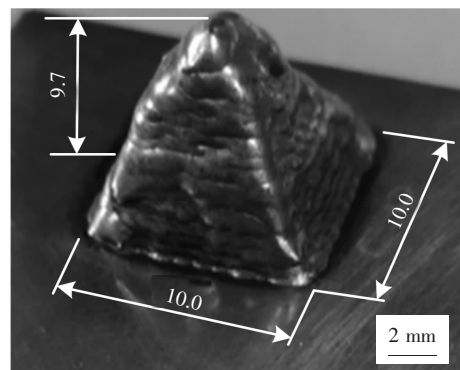


图9 微形金字塔

3 结论

(1) 高能脉冲精密冷焊的输出电流为脉冲方波,产生断续的脉冲电弧;脉冲电流和脉冲时间控制精确,其脉冲时间短,电弧能量密度高,冷却时间长,热输入小,零件变形小。

(2) 工件处于冷态,熔池存在时间短,不会出现焊缝熔池流淌现象,特别适合棱边、棱角的精密堆焊成形;可实现各倾斜圆柱零件的堆焊成形,具有复杂零件的增材制造成形能力。

(3) 采用该方法增材制造零件的成形精度高,但堆焊成形效率较低,可用于较小的几何形状复杂零件的增材制造,也可用于精密零件的增材制造成形修复。

参考文献

- [1] 耿海滨,熊江涛,黄丹,等. 丝材电弧增材制造技术研究现状与趋势[J]. 焊接, 2015(11): 17-21.
- [2] Ding J, Colegrove P, Mehnert J, et al. A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1-4): 227-236.
- [3] 柏久阳,王计辉,林三宝,等. 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 87-90.
- [4] Song J L, Li Y T, Deng Q L, et al. Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 614-618.
- [5] 田彩兰,陈济轮,董鹏,等. 国外电弧增材制造技术的研究现状及展望[J]. 航天制造技术, 2015(2): 57-59.
- [6] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015(81): 465-481.
- [7] 李玉龙,张华,张光云,等. 基于 TIG 堆焊技术的低碳钢零件精密快速成形[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 37-40.
- [8] Ding J, Colegrove P, Mehnert J, et al. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(12): 3315-3322.
- [9] 杨春利,林三宝. 电弧焊基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [10] 赵家瑞. 逆变焊接与切割电源[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [11] 刘一博,孙清静,姜云禄,等. 基于冷金属过渡技术快速成形工艺[J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 1-4.
- [12] 张萍,刘德波,柏久阳,等. 电弧增材制造的沉积态 TC4 钛合金薄壁零件组织特征[J]. 焊接, 2015(11): 53-56.
- [13] Martina F, Mehnert J, Williams S W, et al. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacturing of Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6): 1377-1386.

第一作者简介: 焦文清,1990 年出生,硕士研究生;主要研究方向为金属增材制造。

通信作者简介: 韩红彪,1971 年出生,博士,教授,博士生导师;主要从事电火花沉积和金属增材制造方面的科研和教学工作;已发表论文 60 余篇。

国际焊接学会第 72 届年会及国际会议

国际焊接学会(IIW)第 72 届年会及国际会议将于 2019 年 7 月 7-12 日在斯洛伐克首都布拉迪斯拉发召开。会议由斯洛伐克焊接学会和斯洛伐克焊接研究所主办。国际会议的主题为汽车行业材料与焊接工艺的新进展。目前会议已开通了网上报名,了解会议的最新信息,敬请关注官方网站 www.iiw2019.com。

国际焊接学会(IIW)成立于 1948 年,是全球最有影响力的国际焊接组织,目前共有 55 个会员国家。IIW 每年召开一次学术年会,其下属 20 余个专业学术机构在年会期间开展的学术交流活动代表了全球焊接最前沿技术,内容涵盖材料、工艺、设备、标准、培训与认证等各个方面,每年吸引着全球 700 余位专家学者参会。

(中国机械工程学会焊接分会秘书处 黄彩艳)