

LF6 铝合金激光填丝点焊工艺研究

陶 汪^{1,2} 马轶男¹ 陈彦宾¹ 任跃冲¹

(¹ 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)
(² 哈尔滨工业大学金属精密热加工国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 针对铝合金激光点焊容易出现的问题, 自建了一套精确控制送丝系统, 分析铝合金激光填丝点焊的可行性, 并且研究了送丝角度、延迟时间、送丝量等送丝参数的影响。研究表明, 激光填丝点焊可以明显地改善铝合金激光点焊过程中容易出现的缺陷; 送丝角度是焊丝熔化后能否稳定进入熔池的关键因素, 送丝角为 30° 左右时, 熔化焊丝进入熔池最为稳定; 延迟时间过短, 熔池尺寸过小时送进焊丝, 易造成焊丝在试件上表面的堆积; 而送丝量与焊点表面下塌的改善效果相关。

关键词 激光技术; 激光填丝点焊; 铝合金; 缺陷; 送丝角度; 延迟时间; 送丝量

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1103007

Laser Spot Welding of LF6 Aluminum Alloy with Filler Wire

Tao Wang^{1,2} Ma Yanan¹ Chen Yanbin¹ Ren Yuechong¹

¹ State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

² National Key Laboratory of Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract In view of problems of laser spot welding of aluminum, a precise control wire filler is built, and the feasibility of laser spot welding of aluminum alloy with filler wire and the influences of filler wire angle, wire feed volume, delay time are analyzed. Experimental results show that the filler wire method can improve the defects of laser spot welding of aluminum. The angle of the filler wire is the key factor which influences the stability of the process of the melt wire into the pool. When the wire is feed at an angle of 30° or so, the feed process is most stable. The delay time is one of the main factors which determine the pool size. When the delay time is too short, the filler wire can be easily accumulated on the surface of the specimen. The volume of the wire feed into the pool is directly related to the improved effect of collapse.

Key words laser technique; laser spot welding with filler wire; aluminum alloy; defect; filler wire angle; delay time; wire feed volume

OCIS codes 140.3390; 140.3470; 160.3900

1 引言

铝及其合金很轻, 并且具有高的比强度, 好的可成形性, 低温下仍具有良好的机械性能。此外, 铝及其合金的抗腐蚀性能优良。铝及其合金广泛地应用于航空、汽车、造船、铁路车辆、容器及电子零部件等领域^[1], 尤其是在车辆制造上, 新型的轻合金材料在汽车中的应用越来越多。

近年来激光焊接受到了很大的关注, 这是因为

激光焊接具有高的能量密度、高的精确性、灵活性和焊接速度。随着高功率 CO₂ 激光器和机器人控制的发展, 激光焊接在结构制造和汽车工业中的应用越来越多^[2-3]。激光点焊技术有很大的应用空间, 它不但能够增加生产效率, 而且还能减轻结构重量和满足新的结构设计。激光点焊技术所具有的高精度、高柔性的特点是其他技术很难替代的巨大优势。而激光焊接铝合金已有了工业应用, 欧洲空中客车

收稿日期: 2013-03-25; 收到修改稿日期: 2013-06-16

作者简介: 陶 汪(1981—), 男, 博士, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: taowang81@sina.com

公司生产的 A318 和 A380 客机就利用了激光焊接技术,代替了原来的铆接工艺;德国的奥迪 A8 全铝轿车中也采用了激光焊接技术^[4-8]。

虽然激光点焊有许多优势,但是在焊接铝合金等低熔点材料时,还存在如下几个主要的困难^[8-11]: 1) 铝合金点焊的裂纹问题。铝合金是典型的共晶型合金,焊缝结晶组织方向性强,并且激光点焊加热冷却速度很快,容易产生焊接热裂纹;2) 铝合金点焊中的表面下塌,铝合金熔沸点很低,并且液态铝合金的粘度低,流动性好,在重力的作用下,很容易在焊点表面形成较大的下塌;3) 铝合金点焊焊点的抗剪力较低。由于激光加热面积小,焊点的熔合面尺寸较小,焊点的抗剪力很低。

针对铝合金激光点焊过程中存在的问题,采用 CO₂ 激光进行 LF6 铝合金激光填丝点焊的焊接性

研究。并从焊点成形、送丝角度、送丝量等方面进行理论分析,对激光填丝点焊的工艺特性进行研究。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

实验用母材为 LF6 铝合金。LF6 属于 Al-Mg 系合金,为非时效强化铝合金。LF6 铝合金的强度比纯 Al 高,焊接性好。该铝合金在常温下的组织为 α 固溶体和 β 相 (Al₃Mg₂) 及弥散分布的二次强化相 β' (Mg₂₃Al₃₀)。试样尺寸为 100 mm×25 mm×1 mm, 其主要的化学成分如表 1 所示。根据母材的成分,本实验所用的焊丝为 ER5356 铝合金,其化学成分如表 2 所示,所选用的焊丝直径为 1.2 mm。

表 1 LF6 铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of LF6 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	other	Ti	Al
0.40	0.40	0.10	0.50~0.80	5.80~6.80	0.20	0.20	0.01~0.20	Bal.

表 2 焊丝 ER5356 化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of ER5356 filler wire (mass fraction, %)

Mg	Cr	Fe+Si	Cu	Zn	Mn	Ti	Al
5.00	0.10	0.30	≤0.50	0.05	0.15	0.10	Bal.

2.2 实验方法

激光加工设备包括从德国 ROFIN-SINAR 进口的射频激励扩散冷却 CO₂ 激光器和 CNC 数控工作台。激光器的聚焦方式为透射聚焦,光束最小直

径为 0.2 mm。实验中焊丝的精确自动送进是通过送丝机及其控制系统来实现的。控制系统的组成包括 LabVIEW 程序、NI 6040E 型多功能数据采集卡、放大电路、继电器和送丝机等。

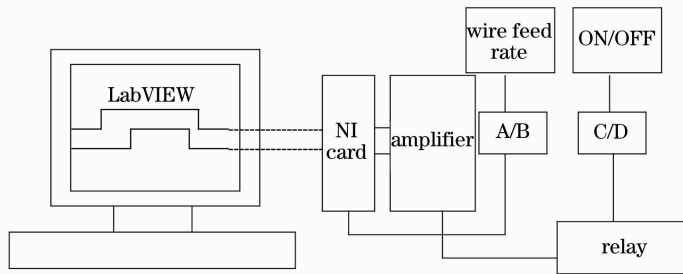


图 1 送丝控制系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of feed wire system

具体的送丝控制过程如下: LabVIEW 程序产生的时序脉冲波形通过 NI 卡输出,经放大电路后,输送到与送丝机相连的继电器中,通过 DAQ 辅助的参数设置,可以很容易地实现对激光出光时间、送丝时间和延迟时间等的控制;而控制送丝电压的信号直接输送到送丝机外控接口,通过调整 LabVIEW 程序的输出就可以实现对送丝速度快慢

的调节。

在焊接实验进行之前,首先用丙酮去除工件表面上的油污,然后将试件放入 40 °C ~ 60 °C 的 NaOH 溶液中碱洗 5 min,再将带有挂灰的试件放入质量分数为 30% 的硝酸中漂洗 3 min 左右,最后用清水再将试件冲洗一遍。清洗完后,用压缩空气将残留在试件表面的水吹干,并将试件放入烘干炉

中,在 50 ℃左右的炉温中烘干约 15 min。焊接过程如图 2 所示。

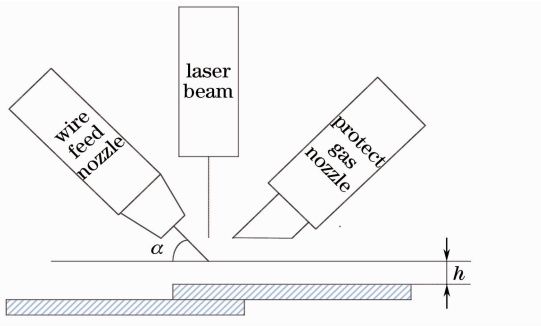


图 2 激光填丝点焊示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser spot welding with filler wire

焊后将接头进行垂直切割,并将镶好的试样用砂纸逐级磨光,然后用直径为 1 μm 的金刚石抛光机进行抛光,抛光后的试样采用体积比 $V(\text{HF}):V(\text{HCl}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:1.5:2.5:9.5$ 的腐蚀剂进行腐蚀。

利用 OLMPUS 金相显微镜对成型接头进行观察;在 INSTRON-5569 电子万能材料试验机上进行拉伸试验,拉伸速度为 1.0 mm/min。

3 实验结果及讨论

3.1 送丝参数对激光填丝点焊过程的影响

3.1.1 送丝角度的影响

激光焊接过程中,由于激光辐照金属材料导致材料气化而产生大量的光致等离子体。激光填丝焊中,不仅入射的激光束作为焊丝熔化的热源,焊接过程中产生的等离子体同样会对焊丝产生加热的作用^[12],也就是说,焊丝是在激光束的直接辐照和等离子体加热的共同作用下熔化的^[13-14]。当焊丝通过光致等离子体区域时,焊丝会受到光致等离子体的加热作用^[15]。不同的送丝角度会影响焊丝在光致等离子体中加热的长度,从而影响光致等离子体对焊丝的加热作用。图 3 所示为采用不同的送丝角度进行激光填丝点焊过程中,焊丝与等离子体的图像。

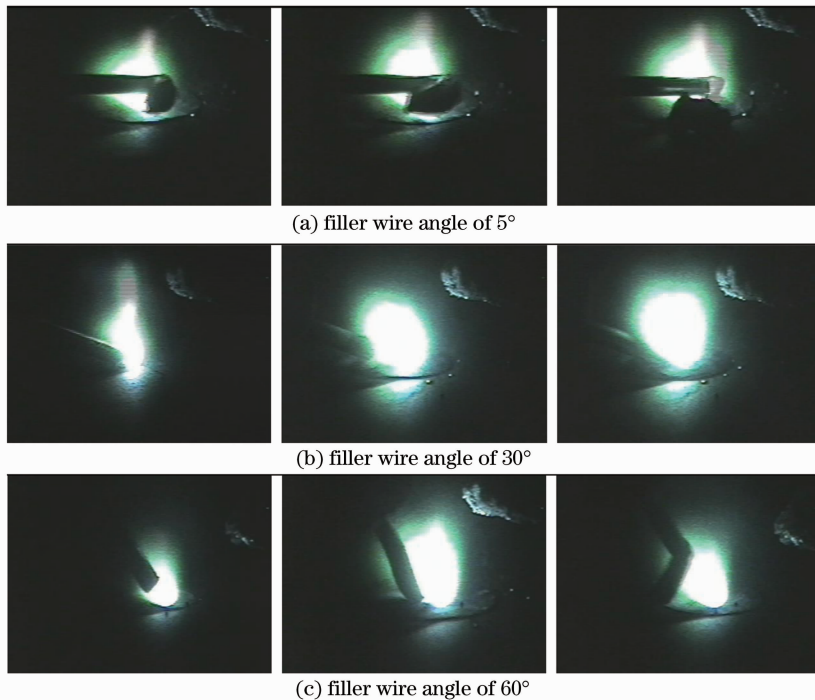


图 3 不同送丝角度点焊过程 CCD 图像

Fig. 3 CCD images of laser spot welding process with different filler wire angles

从图 3 中可以看出,当送丝角度为 5°时,焊丝受到等离子体加热的区域范围较小,其对焊丝的加热作用比较不充分,随着焊丝继续向前送进,当焊丝熔化形成熔滴时,焊丝已经送到了超过熔池中心的部位。当焊丝以 30°的角度送进时,焊丝可以在等离子体区域中受到充分的加热,焊丝熔化所形成的熔

滴可以很好地进入到熔池中,形成稳定而有效的过渡。而当焊丝以 60°的送丝角度被送到等离子体区域中时,焊丝在送进过程中受到的加热作用较大而发生提前软化,加上正面保护气的吹送,使得焊丝在云团状等离子体的边缘处发生弯折,熔化焊丝被吹到熔池的边缘甚至母材上,不能实现有效和稳定的

熔滴过渡。

由此可见,送丝角度较大时,焊丝进入等离子体内部的长度过长,等离子体对焊丝的加热作用很大,造成焊丝在等离子体边缘处发生弯折,从而导致送丝过程的失败;送丝角度很小时,焊丝进入等离子体内部的长度过短,造成焊丝送进时,焊丝熔化不充分,熔滴过渡不稳定;当以 30° 左右的角度送丝时,焊丝进入等离子体的长度适中,同时熔滴过渡稳定,

是合适的送丝角度。

3.1.2 延迟时间的影响

延迟时间 t_d 指的是激光器出光开始的时刻和焊丝开始送进的时刻之间的那段时间,如图 4 所示。首先分析了激光功率为 1600 W,点焊时间为 1.5 s 的条件下,送丝时间和点焊时间相等,而延迟时间为零的情况。

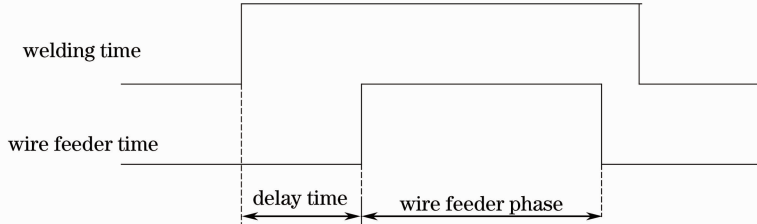


图 4 时序脉冲波形图

Fig. 4 Oscillograph of sequence pulse

从图 5 可以看到,激光刚出光就开始送丝时,熔



图 5 $t_d=0$ s 时熔池形貌

Fig. 5 Molten pool at $t_d=0$ s

池还没有形成,熔化的焊丝全部堆积在试件的表面,背面没有熔透,甚至上下板无法实现连接。这是因为出光时,激光直接打在焊丝上,激光输出的能量不能直接作用于母材,只能通过熔化的焊丝所带有的热量及等离子体辐射传递给母材,因此传递到母材中的热量很低,母材不能充分熔化,也就不能形成较大尺寸的熔池,造成了熔化的焊丝在母材的表面堆积。

如图 6 所示,激光功率为 1600 W,点焊时间为 1.5 s,送丝速度为 3.2 m/min,送丝时间 $t_f=0.5$ s 时,延迟时间 t_d 分别为 0.5 和 1.0 s 时的焊点成形。

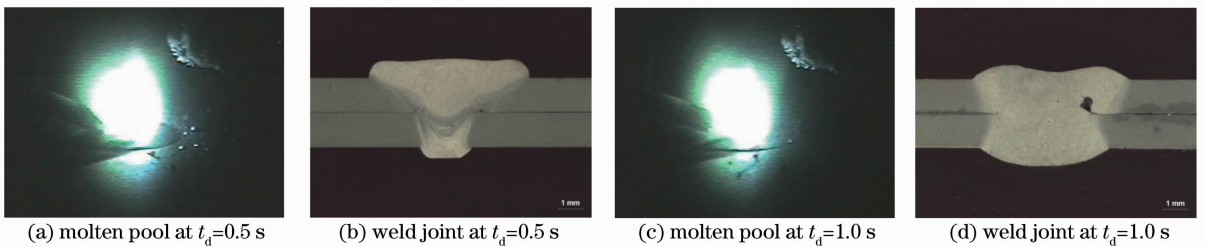


图 6 不同延迟时间焊点成形

Fig. 6 Weld joint with different delay time

对比图 5 和图 6(a)、(c)可以明显地看到,当存在延迟时间时,会形成熔池,而且随着延迟时间的增加,熔池的尺寸增大。而对比图 6(b)和(d)可以发现,延迟时间为 0.5 s 时,由于在延迟时间内,激光输入到母材中的热量很少,焊点背面的尺寸没有充分地扩展。

从图 7 中可以看到,延迟时间为 0.5 s 的焊点

和 1.0 s 的焊点在正面尺寸几乎相等,但是延迟时间为 0.5 s 的焊点的背面和熔合面直径则要比延迟时间为 1.0 s 的焊点尺寸小 50% 以上,焊点的成形也由 X 形变为 T 形。之后,焊丝送进,激光输入功率开始有一部分用于熔化焊丝,从而使得母材获得的热量相应地减少,最后形成的焊点有着一定的余高。

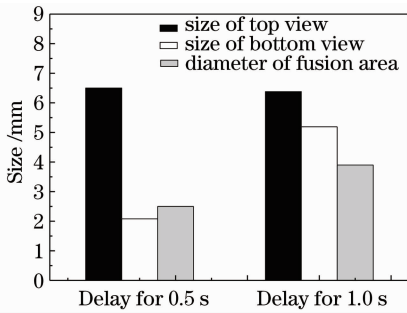


图 7 不同延迟时间的焊点尺寸比较图

Fig. 7 Size of weld joint with different delay time

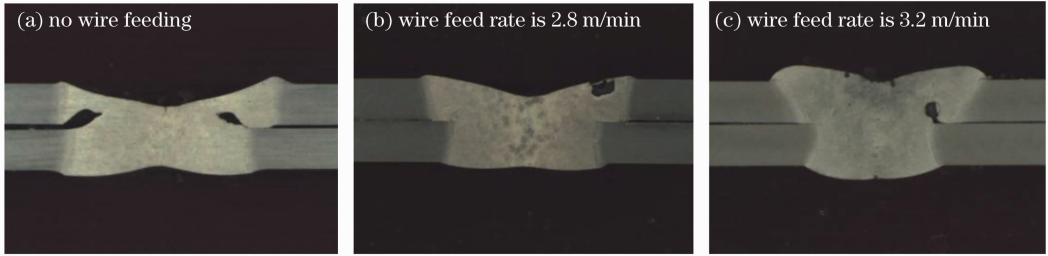


图 8 不同送丝速度下焊点的成形

Fig. 8 Weld joint with different wire feed velocities

从图 9 可以看到,随着送丝速度的增加,送进的焊丝对焊点表面下塌的改善作用增加,甚至在较高的送丝速度下,熔化的焊丝在焊点表面形成了一定的余高。同时,随着送丝速度的增加,焊点的背面尺寸有减小的趋势,这是因为随着送丝量的加大,使得激光用于熔化焊丝的那部分能量增加,而相应的母材获得

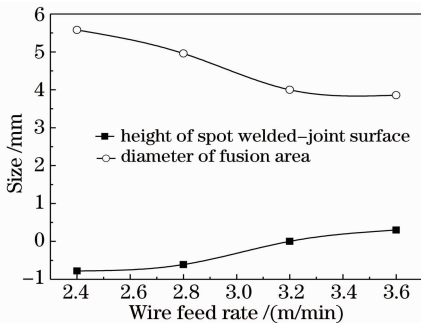


图 9 送丝速度对焊点成形的影响

Fig. 9 Influence of wire feed velocity on weld joint formation

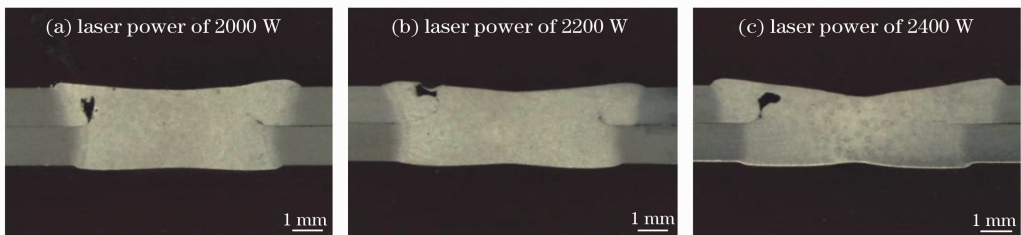


图 10 不同功率下焊点的成形

Fig. 10 Weld joint formation with different laser powers

通过对不同延迟时间的对比,可以得出:点焊送丝时,延时时间的长短对焊点的形态影响很大,没有延迟时间将无法形成焊点;要想使焊点背面具有一定的尺寸,延迟时间不能太短;延迟时间过短时,焊点呈 V 形,随着延迟时间的延长,在焊点背面尺寸保证的条件下,焊点呈 X 形。

3.1.3 送丝速度的影响

图 8 所示为在功率为 1600 W,点焊时间为 1.5 s,延迟时间为 1 s,送丝时间为 0.3 s 的情况下,焊点的成型情况。

的能量减少,从而导致了焊点背面尺寸的减小。

随着送丝速度的增加,上表面直径变化不大。从图 9 可以清楚地看出焊点熔合面尺寸和焊点表面高度的变化规律。随着送丝速度的增加,焊点的熔合面直径变小,而焊点表面,则由下塌逐渐变为了有一定的余高,而将下塌填满的临界送丝速度为 3.2 m/min。

而下表面和熔合面直径的变化规律几乎是相同的,都是随着送丝电压的增大而减小。经计算可以得到,焊点的熔合面直径与下表面直径之比一直在 89% 左右波动。因此可以通过焊点的背面尺寸来推断焊点的熔合面尺寸。

3.2 激光参数对激光填丝点焊过程的影响

3.2.1 激光功率的影响

随着激光功率的增加,在送丝量不变的情况下,焊点的尺寸得到了增加,同时焊点的成型由饱满变

为带有下塌的形态,如图 10 所示。功率增加,要相应地增加送丝量,以避免下塌的出现。

3.2.2 点焊时间的影响

实验中,选择功率为 1600 W,延迟时间为 1 s,送丝时间为 0.5 s,送丝速度为 4 m/min,点焊时间为 1.5 s 和 2.0 s 的实验条件。结果发现二者的焊点形态基本相同。从图 11 中可以看出,当点焊时间由 1.5 s 增加到 2 s 时,焊点的上表面、下表面和熔合面直径分别增加了 14%,24%和 25%。可见,随着点焊时间的增加,焊点的尺寸近似以相同的速度增长。

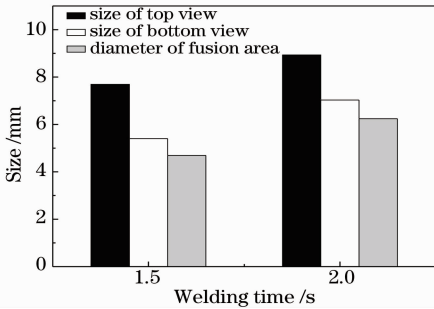


图 11 不同点焊时间的焊点尺寸比较图

Fig. 11 Size of weld joint with different welding time

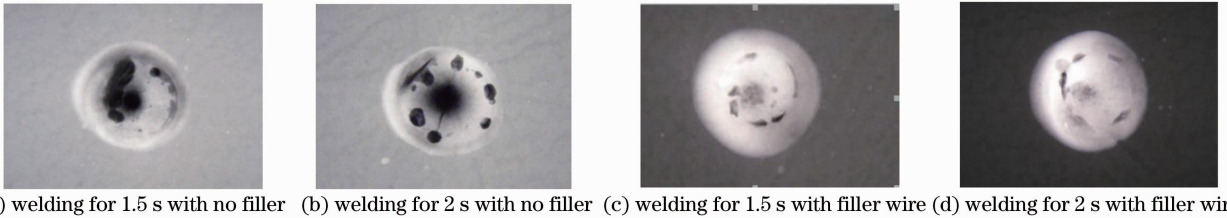


图 12 填丝与未填丝焊点 X 射线气孔比较

Fig. 12 Pore comparison between welding with filler or and filler wire by X-ray

从图 12 中发现气孔在焊点中的分布位置有所变化。在焊点的表面有焊点凝固时将要浮出熔池的气泡形成的气孔。没有填丝的焊点的气孔多分布在接近表层的地方。通过填丝工艺焊接的焊点的气孔分布成一个圆环状,圆环的尺寸与熔合面的尺寸相当。而从对未填丝焊点的剖面图分析来看,气孔的

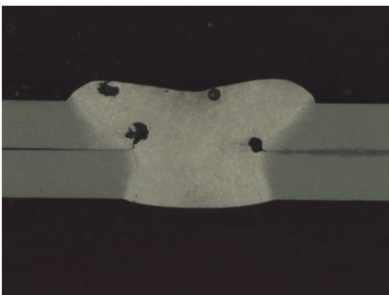


图 13 焊点内部气孔和未熔合的分布

Fig. 13 Distribution of pore and poor fusion in weld joint

通过上述激光参数对焊点成形的影响可以看到,激光功率和点焊时间对焊点成形的影响主要表现在对焊点尺寸的影响,而焊点的形态变化并不是很大,所以送丝参数才是决定焊点成形的主要因素。在实际应用中,可以根据具体的激光功率和点焊时间,给出合理的送丝工艺参数,以确保焊点的成形和尺寸。

3.3 填丝对激光点焊缺陷的改善

3.3.1 气孔缺陷

图 12(a)和(b)是没有填充填丝的焊点的 X 光照片,其中黑色的圆形影像为气孔。从图中可以清晰地看到,焊点中存在大量的气孔,而且尺寸较大,有时这些大的气孔会连接在一起,形成更大的孔洞。这些气孔的分布位置多在远离焊点中心的边缘部位,并且靠近表面。图 12(c)和(d)是进行填丝工艺后的焊点的 X 光照片,其中黑色条状影像为气孔。相对于没有填丝的焊点,填丝之后,焊点中气孔的数量明显减少,这可以从黑色部分占整个焊点的面积推断出来。焊点中气孔形态也发生了变化,由填丝之前的圆形变为了填丝之后的条形。

确是大多分布在焊点与母材交界处的熔合面附近(图 13)。在这个部位,不只存在着气孔,还有很多的未熔合,这是由于在熔合面所在的上下板交界处容易存在未清除的氧化膜、水分和气体等,而在焊点的边缘部位激光功率密度不够,不足以熔化高熔点的氧化膜等,从而容易在焊点与母材相交的熔合面处产生气孔和未熔合等缺陷。

3.3.2 表面裂纹缺陷

在点焊完成后,对填丝和没有填丝的焊点表面和内部的裂纹进行了比较。从图 14(a)~(c)中可以看到未填丝时焊点的表面和内部都有裂纹存在,其中内部的裂纹几乎要贯穿整个焊点。焊点中存在从焊点中心发出的放射裂纹,从图 12(b)的 X 光照片中可以明显地看到放射裂纹的存在。在前面提到,背面吹送保护气体时,焊点的背面也有裂纹的存在。

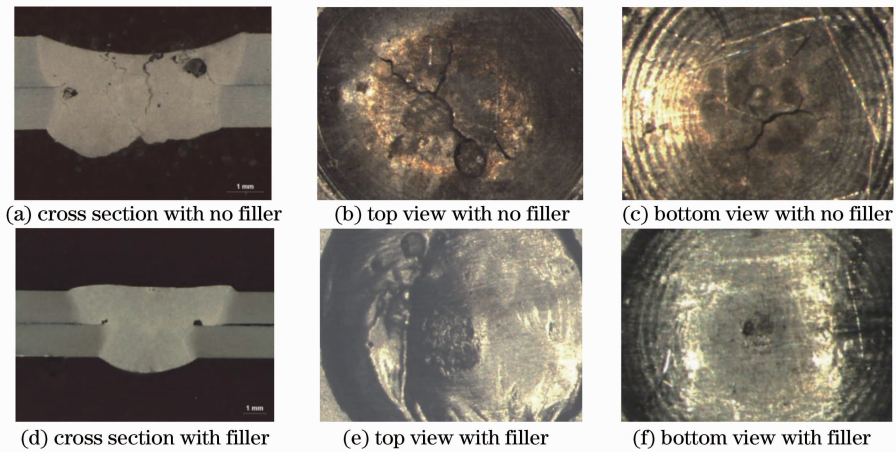


图 14 填丝与未填丝焊点裂纹的比较

Fig. 14 Comparison of cracks between weld joints with filler and no filler

填丝之后,从图 14(d)~(f)中可以看到在焊点的表面和内部没有发现明显的裂纹,可见填入焊丝之后,对焊点裂纹的改善作用还是很显著的。产生结晶裂纹的原因是焊点中存在液态薄膜和焊点凝固过程中受到拉伸应力的共同作用。而通过填丝减少甚至消除焊接热裂纹也正是针对这两个方面入手的。一方面,填入的焊丝使得焊点的下塌得到了改善,从而减小了焊点下塌处的应力集中;另一方面,加入的焊丝也是低熔点的合金,填入焊丝后,增加了低熔共晶的数量,消除了液态薄膜。

经过对比填丝和没有填丝的焊点发现,通过填丝可以改善焊点的成形,消除下塌;同时,减少了焊点下塌处存在的应力集中,对减少焊点中的裂纹起到积极的作用;此外,填丝对焊点中的气孔缺陷也有一定的改善作用。

3.4 填丝对激光点焊力学性能的提高

图 15 所示为在激光功率相同情况下,改变送丝速度所获得焊点的拉剪性能数据对比图。其中编号为 5 的试样为未填丝的激光点焊试样,其余四组数

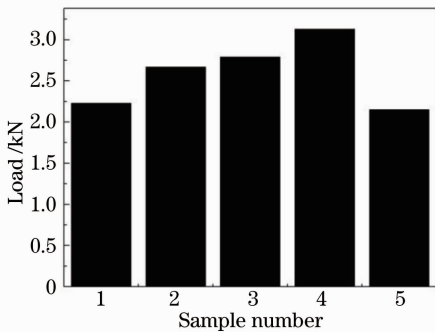


图 15 不同送丝速度拉剪力对比

Fig. 15 Comparison of weld joints with different feeding rates

据从编号 1 至 4 对应的送丝速度分别为 2.4、2.8、3.2、3.6 m/min。从图中可以发现,填丝焊点的力学性能一般都要比未填丝焊点的要高。未填丝焊点的拉伸力为 2.16 kN,而图 15 中填丝焊点的最大拉伸力为 3.13 kN,比没有填丝的焊点的拉伸力高出近 46%。由此可见,通过填丝的方法,可以明显提高激光点焊接头的拉剪力性能。

4 结 论

1) 在一定的激光功率和点焊时间下,送丝角度为 30° 左右时,送丝效果最好。送丝角度太大或太小都易造成送丝的不稳定。填丝的工艺参数中,送丝的延迟时间很重要,它决定了焊点背面和熔合面的尺寸。在 1.5~2 s 的点焊时间内,延迟时间一般选为 1~1.2 s 左右。送丝速度太小,下塌不能完全消除;送丝速度太大,影响焊点熔合面的尺寸。合适的送丝速度范围为 3.0~4.0 m/min。

2) 随着激光功率的增加,在送丝量不变的情况下,焊点的尺寸得到了增加,同时焊点的成形由饱满变为带有下塌的形态;当点焊时间由 1.5 s 增加到 2 s 时,焊点的上表面、下表面和熔合面直径分别增加了 14%,24%和 25%。可见,随着点焊时间的增加,焊点的尺寸近似以相同的速度增长。

3) 通过合适的填丝工艺获得的焊点成形良好,可以消除下塌,同时对点焊时出现的气孔和下塌等缺陷也有较好的改善作用。

参 考 文 献

- 1) J K Bayshore, M S Williams, Y Adonyi, *et al.*. Laser beam welding and formability of tailored blanks[J]. *Welding Journal*, 1995, 74(10): 345-352.

- 2 Masashi Oikawa, Katsuhiko Minamida. Development of the laser spot welded stainless steel panel for vehicle body[C]. ICALEO, 2006. 330—336.
- 3 A Matsunawa, S Katayama, H Ikeda, *et al.*. Effect of pulse shaping on defect reduction in pulsed laser welding [C]. ICALEO, 1992, 92(75): 547—556.
- 4 Song Dongfeng, Hu Shengsun, Ma Li. Development of laser-based welding of aluminum alloy[J]. Electric Welding Machine, 2004, 34 (9): 1—3.
宋东风, 胡绳荪, 马 力. 铝合金激光焊接技术的发展现状[J]. 电焊机, 2004, 34(9): 1—3.
- 5 Liang Xueping, Su Shihuai. Laser welding of automobile tailored blank[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1996, 17(4): 63—69.
梁雪平, 苏世怀. 汽车拼板的激光焊接[J]. 钢铁钒钛, 1996, 17 (4): 63—69.
- 6 Yang Chunyan. Application and development of laser welding technology[J]. J Xi'an Aerotechnical College, 2008, 26 (5): 18—20.
杨春燕. 激光焊接技术的应用与发展[J]. 西安航空技术高等专科学校学报, 2008, 26(5): 18—20.
- 7 Fang Zhimin, Xie Songjing, Yao Jianhua. The application of laser machining in advances manufacturing technology [J]. Mechanical Engineer, 2003, (8): 27—30.
方志民, 谢颂京, 姚建华. 激光加工在先进制造技术中的应用[J]. 机械工程师, 2003, (8): 27—30.
- 8 J M Jouvard, K Girard, O Perret. Keyhole formation and power deposition in Nd:YAG laser spot welding[J]. Applied Physics, 2001, 34(18): 2894—2901.
- 9 T W Juhl, F O Olsen. Assessment of hot crack properties of laser welded stainless steel alloys [C]. SPIE, 2003, 4831: 224—229.
- 10 I Mys, M Geiger. Use of pre-pulse in laser spot welding of materials with high optical reflection[C]. SPIE, 2003, 5063: 314—318.
- 11 A Matsunawa, M Mizutani, S Katayama, *et al.*. Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding[J]. Welding International, 2003, 17(6): 431—437.
- 12 Chen Yanbin. Laser Welding Technology[M]. Beijing: Science Press, 2005. 96—97.
陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 96—97.
- 13 Xiao Rongshi, Chen Kai, Zuo Tiechuan. Influence of wire addition direction in CO₂ laser welding of aluminum[C]. SPIE, 2002.
- 14 A S Salminen, V P Kujanpää. Effect of wire feed position on laser welding with filler wire[J]. 2003, 15(1): 2—10.
- 15 U Diltthey, D Fuest, W Scheller. Laser welding with filler wire [J]. Optical and Quantum Electronics, 1995, 27 (12): 1181—1191.

栏目编辑: 宋梅梅