

# 熔融金属填充焊接工艺试验系统设计

武少杰，高洪明，张宗郁

(哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室，哈尔滨 150001)

**摘要：**为了解决目前弧焊工艺中热输入难以控制的问题，适应高效化生产的需求，提出了一种熔融金属填充焊接新工艺。重点介绍了方法的试验系统构成原理及各组成部分的设计。利用锡铅合金为试验材料，对系统进行堆焊验证试验。试验证明系统能够很好的控制液流的温度和直径、焊接速度以及气体压力，实现对焊接过程中焊接热输入的精确控制。结果表明，该装置能够实现熔融金属填充焊接工艺的试验要求，利用该系统得到的焊缝深宽比最大能够达到6。

**关键词：**熔融金属填充；高频电源；石墨坩埚；锡铅合金；深宽比

**中图分类号：**TG 442    **文献标识码：**A    **文章编号：**0253-360X(2015)11-0109-04

## 0 序 言

在目前的焊接生产中，电弧焊仍然占有主导地位。但由于电弧的穿透能力有限，熔池较浅，所形成的焊缝较宽，对于厚壁构件，需要单面或双面开坡口，大量填充焊接材料，导致成本增加，效率不高<sup>[1]</sup>。

为了提高效率，需要采用大参数，但当焊接电流过大时，焊接过程不稳定，影响熔敷率的进一步提升。虽然后续又提出了双丝焊<sup>[2,3]</sup>、多丝焊<sup>[4,5]</sup>等工艺，但焊丝快速熔化填充的同时，工件过热严重，接头性能退化。尤其是对于一些高强度级别的材料，如高强度钢、热处理强化高强铝合金等材料，对加热比较敏感，要求严格控制热输入，使效率的提高受到制约<sup>[6,7]</sup>。另外采用自动化焊接，需要制备焊丝，有些材料的塑性差，如镁合金，导致焊丝制备困难或焊丝容易脆断影响连续焊接<sup>[4]</sup>。

虽然可以采用电子束焊接、激光束焊接等高能量密度热源，但这些工艺的实施存在成本高、过程复杂、效率低等各种问题。根据目前焊接工艺存在的上述问题，提出了一种液态金属填充焊接新工艺。

## 1 熔融金属填充工艺的提出

焊接热源的更新过程也可以看作是焊接工作者不断追求更加精确控制焊接热输入的过程。从电弧焊到激光焊，热源的能量密度越来越集中，控制的精度也越来越高。但对于弧焊等传统热源形式，受限

于电弧参数的高耦合、非线性等原因，依然不能解决控制焊接热输入的问题。

液态金属填充焊接新工艺是通过合适的加热方法将填充材料熔化并加热到一定温度，在压力驱动下形成金属液流喷射到工件上，利用液流携带的热量熔化工件形成熔池，进而利用液流的动能在熔池底部深入挖掘，获得较大的熔深，其原理如图1所示。对于一些较厚或导热较好的材料，可以对工件整体或局部预热（例如电弧预热）实现上述连接过程。因此方法的主要工艺参数包括液流的温度及直径、压力大小以及焊接速度。其中液流温度和压力大小是影响液流挖掘的最核心参数。

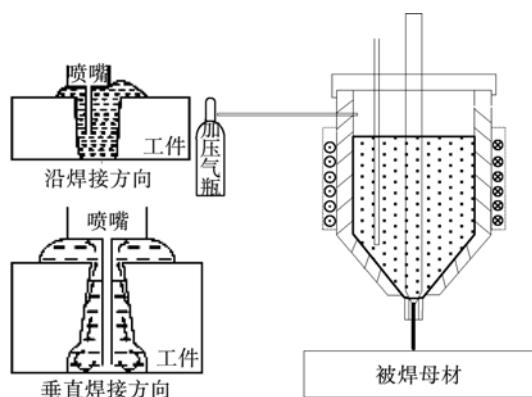


图1 熔融金属填充焊接原理图

Fig. 1 Schematic of molten metal filler welding

利用该工艺能够获得大深宽比焊缝，通过合理匹配液流温度、流速和焊接速度等参数，能够精确控制工件热输入，降低对工件的性能损伤；可以避免合

金元素损失,灵活地调整填充材料成分,进而控制焊接接头性能。该工艺还可以推广应用到快速钎焊、复合材料焊接、功能梯度材料制备及零件快速成形等领域。所以开展金属液流填充焊接技术具有重要的理论及实际意义。

## 2 试验系统设计

熔融金属填充焊接工艺是利用加热装置将填充材料加热至熔融状态,在压力的作用下迫使其从喷嘴喷出,利用液流携带的热量熔化工件形成熔池,并在液流的冲刷作用下增大熔池的深度,随后冷却结晶形成焊缝。要实现这样的工艺过程,其试验系统应该包括加热及控温系统、加压及保护系统、液流尺寸及速度调节。

图2所示为试验装置示意图。试验时通过高频感应加热罐体内的填充金属,通过压力传感器检测压力大小,利用红外测温仪检测填充金属温度,利用行走平台调节焊接速度,需要时可用TIG焊电弧预热工件。

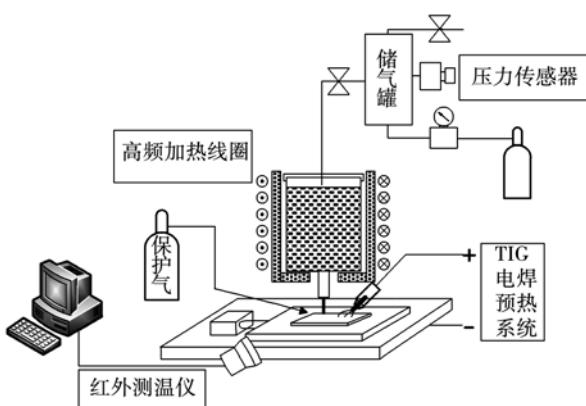


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of welding device

### 2.1 加热及测温装置的选择

高频加热具有加热效率高、加热速度快、低耗节能环保等特点。试验使用SP-25(A)BD型高频感应电源对熔敷金属进行加热,电源的最大功率为25 kW,使用频率在30~80 kHz之间,加热电流为10~52 A。高频感应设备配合红外测温装置可以实现对填充金属的加热及温度的测量,加热温度最高可以达到1 000 ℃,可以满足低熔点金属,如锡铅合金、铝合金和镁合金等的工艺要求。

通过红外测温仪测量填充金属的温度。红外测温仪是通过测量目标的红外辐射量,然后通过测温

仪计算出被测目标温度的。由于使用的红外测温仪只能测量一点的温度,试验时为了方便,是将红外测温点打在喷嘴上,测量喷嘴的实时温度,而不是直接测量填充金属的温度。由于喷嘴位于高频线圈外,所以没有直接被高频电源加热,而是依靠热传导升温,这样测出的温度与填充金属的实际温度有较大的误差,故在实际试验过程中通常会在加热到规定温度后调节加热电流,将罐体保温一段时间,使罐体与填充金属的温度能够接近,以获得较为准确的温度值<sup>[5]</sup>。

### 2.2 液流控制及保护装置的设计

液流流速随压力大小发生变化。由于方法所需要施加的压力在100 kPa以下,而一般的压力减压表在这个范围内的输出压力误差很大,而且极不稳定,为了尽量保证输出压力的稳定、准确,设计并制作压力控制装置。

压力控制装置理论示意图如图3所示,控制装置主要包括储气罐、压力传感器、气瓶、压力减压表以及电磁阀等几个部分。其中压力传感器显示压力为相对于大气压的压强。该装置可以将压力精度控制到1 kPa。

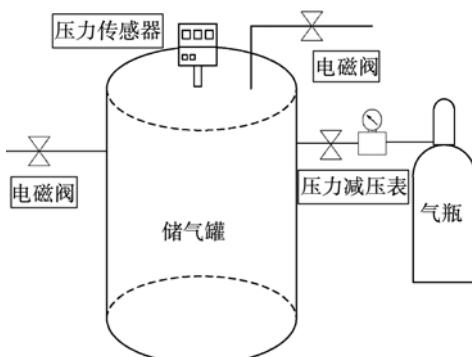


图3 压力控制装置示意图

Fig. 3 Schematic of controlling pressure device

设定压力时先将控制压力出口以及调压口的电磁阀关闭,调节压力减压表到设定的压力值,打开压力进口的电磁阀,观察压力传感器上示数的变化,当达到规定的压力值时,关闭进口的电磁阀,等待一段时间,传感器示数会因为储气罐内气体变得均匀而有所下降,打开进口的电磁阀进行微调,直到示数稳定在设定的压力值为止。当准备喷射液流时,将压力出口打开,这时坩埚和储气罐会形成一个密闭的空间,由于罐体的体积要远远小于储气罐的体积,可以近似认为这个密封空间内的压强处处相等,这就相当于将一个恒定的压力加载在填充金属上,液流也就能获得一个稳定的速度。如果需要在喷射过程

中改变压力的大小, 可以打开调压阀, 及时改变压力大小。

液流尺寸依靠更换不同口径的坩埚进行调节。液流暴露在空气中时需要保护, 防止焊接过程中熔池氧化或吸入有害气体。使用自制的保护气体装置安放在喷嘴周边, 对液流进行保护。保护气流量不易过大, 以免对液流冷却作用过强, 影响焊接过程。

### 2.3 液流产生装置的设计

液流产生装置主要包括石墨罐、喷嘴、压盖 3 个部分。罐体材料不仅应具有良好的导磁性, 还需要保证在高温下不会变形, 有良好的密封性和可加工性。石墨具有强度高、熔点高、不易变形、容易加工、导磁性好等特点, 选用石墨作为罐体材料, 而且石墨表面光滑, 还可以减少液态金属流动时的阻力。石墨性能如表 1 所示。

表 1 高纯石墨及高功率石墨性能

Table 1 Property of high purity graphite and high power graphite

	密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	电阻率 $\rho/(10^{-3} \Omega\cdot m)$	硬度 $H(HV)$	抗折强度 $F_{ef}/MPa$
高纯石墨	~1.85	12~15	30	15
高功率电极石墨		9~12	20	10

液流产生装置整体结构及实物如图 4 所示, 采用双层石墨罐嵌套的方式, 外层罐体选用电极石墨, 内层罐体选用高纯石墨。内层罐体的外径为 62 mm, 内径为 54 mm, 高 68 mm。喷嘴直接连在内层罐体上, 口径为 1 mm。外层罐体为外径 80 mm, 内径 64 mm, 高 80 mm 的桶状结构, 在桶底面中心位置加工直径为 25 mm 的圆孔, 为喷嘴留出空间。该装置的容积约为 137 000 mm<sup>3</sup>。

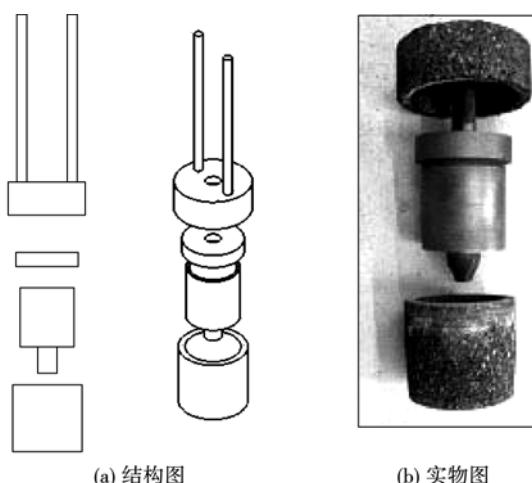


图 4 石墨坩埚结构及实物图

Fig. 4 Picture and structure of graphite crucible

外层电极石墨起加热作用, 高频加热依靠集肤效应, 电极石墨的电阻率低、导磁性好, 在高频中加热速度快, 能够良好的将电能转化为热能, 但是其孔隙率高, 密封性差, 无法实现罐体内的压力控制。内层选用高纯石墨作为密封装置, 高纯石墨的孔隙率很低, 在低压下可以保证良好的密封性, 但电阻率高, 加热效果不如电极石墨。

两种石墨的热传导性都很好, 外层电极石墨罐产生的热能能够又快又好的传到内层高纯石墨罐中, 且石墨的热膨胀系数都很小, 不用担心两层罐体因热膨胀不同而炸裂。喷嘴与罐体连在一起, 喷嘴内设计为锥形, 可以促进液态金属的流动, 减小孔径变化带来的能量损耗。需要改变孔径大小时, 直接更换相应的石墨罐。罐体依靠外层压盖上的石墨棒固定在试验平台上。由于内层压盖需要具备密封作用, 使用石墨垫圈辅助密封。

石墨罐外布置保护铜罩, 铜罩呈圆环形, 周围缠有水冷钢管, 下底面使用中心开口的耐火砖托住石墨罐, 并将石墨罐与工件隔开, 起到保温及安全的作用。整个装置悬挂在支架上, 为喷嘴处腾出空间。铜罩及坩埚高度可通过支架调节, 改变喷口的高度。由于使用高频加热的方式, 而高频时具有集肤效应, 会优先加热最外层的闭合回路, 需要在铜罩上开一贯穿的细缝, 防止高频加热铜罩而不加热石墨罐。图 5 为目前设计的试验平台实物图。

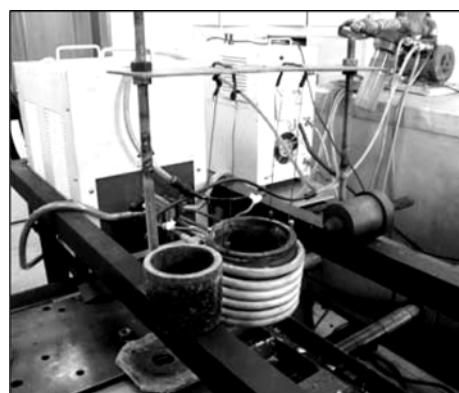


图 5 试验装置实物图

Fig. 5 Picture of welding device

### 3 验证试验

利用试验系统以锡铅合金(63% Sn-37% Pb)为试验材料进行堆焊试验。试验中利用红外传感器实时测量温度, 并最终将温度控制在 500 °C。石墨罐口径为 1 mm。焊接速度为 1.5 m/min。气体压力为 0.2 MPa。图 6 为锡的堆焊试验的金相组织, 可以看

到能够得到深宽比为6的焊缝,同时几乎观察不到热影响区,而且焊缝区的组织明显细化,甚至优于母材。但是试验中焊接过程很不稳定,很难得到成形良好的焊缝;从图6中可以看出表面堆积的金属与母材间有明显的分界线存在,这说明焊缝区及母材区的晶格结构差异很大。

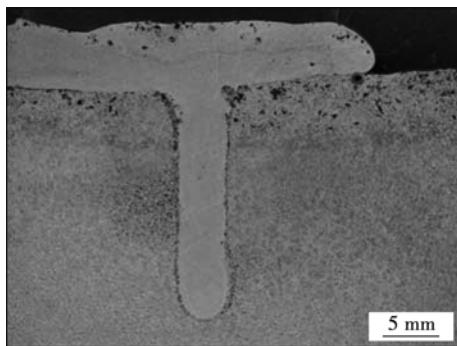


图6 气体压力为0.2 MPa的宏观金相貌

Fig. 6 Microstructure of 0.2 MPa jet pressure

## 4 结 论

(1) 提出了一种熔融金属填充焊接新工艺,利用熔融态金属所具有的热能和动能实现焊接过程中热输入的精确控制,并获得较大深宽比的焊缝。

(2) 设计了加热及控温装置,可以将填充金属的温度最高控制在1000℃,满足低熔点金属,如锡铅合金、铝合金和镁合金等的工艺要求。设计并制造了压力调节装置,可以调节压力大小并输出恒定压强,最小可以控制到1 kPa。设计了双层石墨罐的结构,其容积可以达到137 000 mm<sup>3</sup>,改变喷嘴口径通过更换石墨罐实现。

(3) 在堆焊条件下,以锡铅合金为试验材料,液

流温度为500℃,罐口径为1 mm,焊接速度为1.5 m/min,气体压力为0.2 MPa条件下进行验证试验。得到的焊缝深宽比最大可以达到6。所设计的试验装置可以满足熔融金属填充焊接工艺的试验要求。

## 参考文献:

- [1] 李陈宾, 刘黎明. 激光-电弧复合热源焊接钛合金薄板T形结构件[J]. 焊接学报, 2012, 33(1): 29-32.  
Li Chenbin, Liu Liming. Laser-arc hybrid welding of T-type structure of titanium sheet [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(1): 29-32.
- [2] Li K H, Chen J, Zhang Y M. Double-electrode GMAW process and control[J]. Welding Journal, 2007, 86(8): 231-237.
- [3] Li K H, Zhang Y M. Metal transfer in double-electrode gas metal arc welding[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering Transactions of the ASME, 2007, 129(6): 991-999.
- [4] 曹梅青. 双丝间接电弧气体保护焊研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [5] Lytle A R, Frost E L. Submerged-melt welding with multiple electrodes in series[J]. Welding Journal, 1951, 30(2): 103-110.
- [6] 彭云, 许良红, 田志凌, 等. 焊接热输入对高强铝合金接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(2): 17-21.  
Peng Yun, Xu Lianghong, Tian Zhiling, et al. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of the high strength aluminum alloy welds [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(2): 17-21.
- [7] 张传臣, 陈芙蓉, 高云喜. 7A52铝合金单双丝焊工艺对比分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(9): 67-70.  
Zhang Chuanchen, Chen Furong, Gao Yunxi. Analysis on single and double wire welding technology of 7A52 aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(9): 67-70.

**作者简介:** 武少杰,男,1989年出生,博士研究生。主要从事机器人及智能化焊接。发表论文1篇。Email: 13B909087@hit.edu.cn

**通讯作者:** 高洪明,男,教授。Email: gaohm@hit.edu.cn