

专题讨论—有色金属焊接

# 铝合金 P-MIG 焊接技术的研究现状

陆志强<sup>1,2</sup>, 华学明<sup>1,2</sup>, 李芳<sup>1,2</sup>, 吴毅雄<sup>1,2</sup>

(1.上海交通大学材料科学与工程学院,上海 200240;2.上海市激光制造与材料改性重点实验室(筹),上海 200240)

**摘要:**熔化极脉冲氩弧焊具有热输入量低、生产率高、易实现自动化的特点,适合于铝合金的焊接。铝合金脉冲 MIG 焊不仅扩大了焊接电流范围,而且使电弧稳定性提高,可以适应多种焊接场合。介绍了脉冲 MIG 焊焊铝工艺的研究现状,根据该技术的工艺特点,主要从电弧特性、熔滴过渡、焊接组织性能、焊接过程中的控制、焊接缺陷这几个角度阐述了国内外相关的研究成果和进展,同时提出了该领域的一些研究前景和研究难点,要想深刻理解铝合金 P-MIG 焊接技术还需要更深更广的研究。

**关键词:** 铝合金;脉冲 MIG 焊;焊接技术

**中图分类号:** TG457.14, T-1-1      **文献标识码:** C      **文章编号:** 1001-2303(2009)07-0001-07

## Research status of P-MIG welding technology of Aluminum alloy

LU Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, HUA Xue-ming<sup>1,2</sup>, LI Fang<sup>1,2</sup>, WU Yi-xiong<sup>1,2</sup>

(1.School of Material Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2.Shanghai Key Laboratory of Laser Processing and Material Modifying(Prepared), Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Pulse-MIG welding with low heat input, high productivity, easy automation features is more suitable for aluminum welding. Pulsed MIG welding of aluminum alloy not only expand the scope of the welding current, but also improve the stability of arc, and can adapt to a variety of welding occasions. This paper introduced the pulsed MIG-welding technology of aluminium alloy on the status, mainly about the arc characteristics of welding, the drop transfer, welding structure and properties, welding process control and welding defects. It explains several domestic and international perspectives on the relevant research results and progress. At the same time, this article gives the prospects for the field of study and research difficulties. What's more, in order to thoroughly understand P-MIG welding technology of aluminum alloy, we should need a deeper and broader study in the field.

**Key words:** aluminum alloy; pulsed MIG welding; welding technology

## 0 前言

铝合金是工业中应用最广泛的有色金属结构材料,在航空、航天、汽车、机械制造、船舶及化学工业中已大量应用<sup>[1]</sup>。特别是近些年来科学技术和工业经济的迅速发展,对铝合金焊接构件的需求日益增多,使铝合金的焊接性研究日益深入。铝合金的广泛应用促进了铝合金焊接技术的发展,同时焊接技术的发展又拓展了铝合金的应用领域,因此,铝合金

的焊接问题成为现今焊接技术研究的热点之一。与钢的焊接相比,铝合金的焊接有其复杂的焊接特性<sup>[2]</sup>:热导率和导电性高,凝固速率高,表面易形成氧化层,热膨胀系数高,容易形成气孔,凝固温度范围较大。目前铝合金焊接方法中,熔化极氩弧焊(MIG 焊)的自动化焊接具有高的生产率和良好的适应性以及对表面母材氧化膜有阴极雾化处理作用,在铝合金焊接中得到广泛的应用。

## 1 脉冲 MIG 焊接的技术特点

脉冲 MIG 焊主要包括系统参数和脉冲参数。

收稿日期:2008-05-07;修回日期:2009-06-25

作者简介:陆志强(1984—),男,江苏常熟人,硕士,主要从事焊接设备及自动化、铝合金焊接工艺的研究。

系统参数主要包括焊接速度、焊丝种类和直径、送丝速度、保护气体成分,这些参数的变化对焊缝成形、熔滴过渡等有着重要的影响。脉冲参数包括:(1)基值时间  $t_b$  和基值电流  $I_b$ ,是用于维持电弧的稳定燃烧,调节平均电流的参数;(2)脉冲电流  $I_p$  和脉冲宽度  $t_p$  是决定脉冲能量的参数;(3)平均电流  $I_a$  是决定热输入量的一个重要指标,应根据焊件厚度、焊件材料和焊缝空间位置来选取;(4)脉冲频率  $f$  对平均电流有着重要的影响。通过调节不同的焊接参数可以得到不同焊接特性,优化焊接性能和成形质量。

脉冲波形是对电信号的反映,控制波形决定焊接时工件的热输入量。脉冲焊接主要有矩形、梯形和指数三种脉冲波形,如图 1 所示。

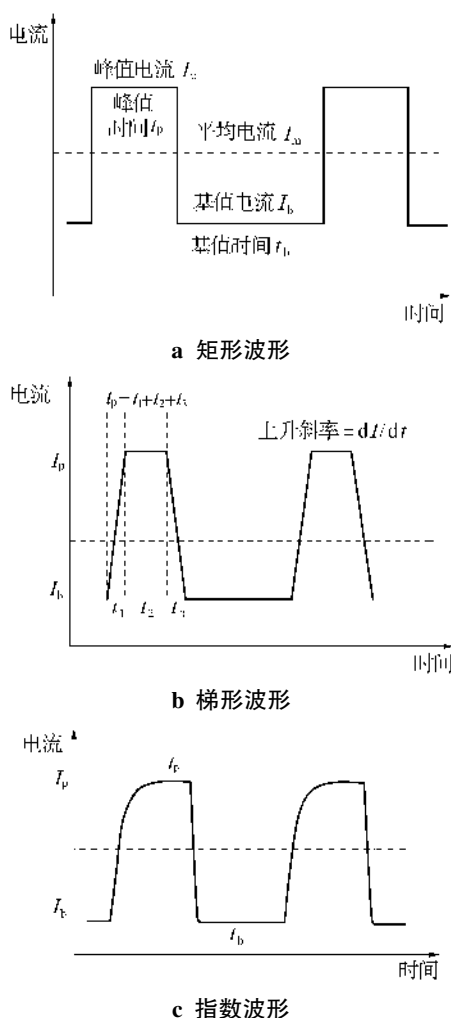


图 1 脉冲焊接的控制波形

为了得到更好的焊接质量和焊缝成形,目前出现了一种新的脉冲焊接方法——双脉冲焊接。该方法同时采用两种不同的脉冲波形和焊接速度,

其波形如图 2 所示。低频波形可以维持电弧长度和电弧的稳定性,高频波形可以有效提高熔池宽度和熔深。



图 2 双脉冲波形

## 2 铝合金脉冲 MIG 焊的研究现状

目前针对铝合金的脉冲 MIG 焊,一般采用 DCEP 接法,同时保护气体用惰性气体,原因主要是对铝合金表面进行保护,防止氧化,起到阴极雾化的作用。该领域的研究方向主要从电弧特性、熔滴过渡、焊接组织性能、焊接过程中的控制、焊接缺陷等几个方面展开。

### 2.1 电弧特性的研究

焊接电弧在焊接过程中对焊件起到热和力的作用,是焊件熔化并形成焊缝的前提。电弧是高粒子密度的等离子体,决定了铝合金的多孔性和焊接热行为对焊缝的化学性能、微观组织、几何形态以及组织引力有着重要影响<sup>[3]</sup>。因此,研究铝合金电弧特性具有很大的价值。电弧形态测量示意如图 3 所示,电弧形态主要通过测量电弧长度、电弧根部直径、电弧投影直径来反映,目前研究都是调节不同的脉冲参数来测量电弧长度、电弧根部直径和电弧投影直径,并观察其变化,从而优化其参数,实现稳定的焊接。

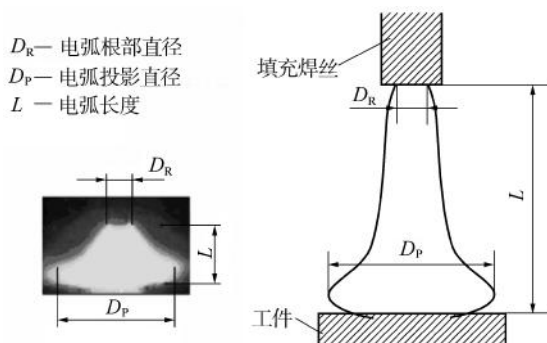


图 3 电弧形态测量示意

文献[4]认为产生电弧的最小电压取决于焊接电源和焊接电压,与恒电流焊接相比,脉冲 MIG 焊在较小平均电压下就能出现电弧,更易得到稳定的电弧。P.K.Ghosh 定义了一个无量纲的公式  $\varphi = (I_b/I_p)$

专题讨论——有色金属焊接

$f \cdot t_b$ , 用于研究脉冲参数对焊接的影响, 通过对 Al-Mg-Zn 进行 P-MIG 焊接, 并采用 DCEP 接法, 发现合理选择  $\varphi$  可以得到稳定的电弧, 从而优化工艺参数<sup>[5]</sup>。

在这个基础上, P.K.Ghosh 又研究了在铝合金 5754 采用 5184 作为焊丝在 P-MIG 焊接过程中,  $\varphi$ 、电弧电压、平均电流的变化对脉冲时间和基值时间期间电弧长度、电弧根部直径、电弧投影直径的影响。实验表明, 在给定电弧电压较小的条件下, 通过调节  $\varphi$ , 可以控制电弧根部直径、电弧投影直径。弧长主要受电弧电压的影响, 而平均电流和  $\varphi$  影响不大, 得出了电弧产生的最小电弧电压, 同时得出较大的基值时间有助于得到稳定的电弧<sup>[6]</sup>。

国内对铝合金脉冲焊接电弧的研究很多, 但研究方向集中于研究电弧的稳定性, 对电弧形态的研究较少。丁伟、侯启孝等人分析了 SAISiS 和 SAlMg<sub>5</sub> 两种铝合金焊丝的熔化特性和不同电源外特性对脉冲 MIG 焊电弧稳定性的影响, 实验结果表明, 平外特性焊接铝合金板材时电弧不稳定, 焊丝干伸长部分经常突然烧断, 而用垂直加外拖电源时, 电压呈有规律的周期性变化, 电弧较为稳定<sup>[7]</sup>。

文献[8]在薄板铝合金变极性脉冲熔化极惰性气体保护焊中, 采用全桥高压脉冲双向稳弧方式, 通过调压器改变高压稳弧脉冲的电压值, 研究了铝合金 VP-PMIG 焊电弧再引燃与稳弧脉冲电压的关系。结果表明, 铝合金 VP-PMIG 焊中, 在小基值电流过零时, 稳弧脉冲电压对电流过零稳定性的影响比基值电流的影响大。

杭争翔、殷树言等人采用高速摄像的方法研究了 AC-PMIG 焊接铝合金的电弧形态<sup>[9]</sup>。电弧 EN 极性时, 电弧上爬 1~1.5 倍焊丝直径的高度, 焊丝端被电弧阴极斑点包围而且呈现亮区, 电弧呈现典型的钟罩形亮区。

## 2.2 熔滴过渡的研究

铝合金 P-MIG 焊接的熔滴过渡方式较为复杂, 在实际焊接过程中希望达到一个脉冲过渡一滴或者多滴, 便于实现稳定的焊接, 能够控制过渡金属量和焊缝成形。一般认为一脉一滴是最为理想的<sup>[10]</sup>, 这样可以使熔滴尺寸接近焊丝尺寸, 实现稳定的焊接过程, 减少焊缝缺陷和飞溅, 得到优良的焊缝金属组织性能。脉冲 MIG 焊一脉一滴过渡示意如图 4 所示。

V.A.Ferraresi 等人通过实验配合高速摄影, 研

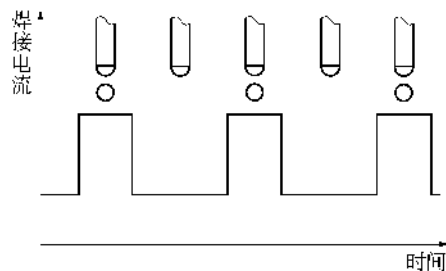


图 4 脉冲 MIG 焊一脉一滴过渡示意

究了  $\varphi$  1.0 mm 和  $\varphi$  1.2 mm 铝硅合金焊丝方式随送丝速度和焊接电压变化而形成不同的熔滴过渡方式, 绘制了在不同送丝速度和焊接电压条件下不同的熔滴过渡方式的区域图。同时指出熔滴喷射过渡有利于获得良好的焊缝成形和焊接性能<sup>[11]</sup>。

S.Subramaniam 等人研究了直径  $\varphi$  1.2 mm 的 4047 铝合金焊丝的 P-MIG 焊接, 调节不同的脉冲焊接参数和焊接电压, 得到了从短路过渡到喷射过渡再到射流过渡的三种过渡方式。试验结果表明, 脉冲焊接参数和焊接电压能够控制熔滴过渡形式、熔滴尺寸大小、熔滴过渡速率以及热输入量<sup>[12]</sup>。

国外很多学者认为, 对于脉冲焊接来说, 通常首先要实现喷射过渡从而得到一系列的脉冲参数。文献[13]在基于高速摄影基础上进行高强度铝合金的双丝 MIG 焊接, 从而得到了不同焊接参数下的不同熔滴过渡形式, 实现了 tandem MIG 焊接一脉一滴的协同控制。

目前对于一脉多滴过渡形式的研究较少, P.K.Ghosh 通过实验对此进行了研究。在 Al-Mg 合金脉冲 MIG 焊的一脉多滴过程中, 熔滴尺寸较小, 在脉冲电流条件下容易发生熔滴脱离焊丝进入熔池的现象。如果选择较长的高基值电流, 熔滴脱离过程也可能发生在基值电流时间。P.K.Ghosh 等人建立了一个数学模型用于分析 Al-Mg 合金 P-MIG 焊接过程中的熔滴过渡行为, 在不同  $\varphi$  和  $I_m$  条件下, 根据该数学模型计算出每一个脉冲过程中过渡熔滴的大小和数量, 但是该数学模型是否完全适用, 需要进行大量的实验来验证<sup>[14]</sup>。

国内, 杭争翔、殷树言、白韶军采用高速摄像的方法研究了铝合金熔滴过渡形式。在电弧 EP 极性脉冲电流时, 电弧呈现典型的钟罩形亮区, 脉冲电流促使熔滴柔顺过渡, 能够实现一脉一滴的熔滴过渡形式。

南京理工大学于景宝对 7A52 铝合金在双丝气体保护焊条件下进行了工艺试验, 对熔滴过渡方

式进行了试验和分析研究,得出了以亚射流和射滴为主的,短路、射流及其他变异形式为辅的熔滴过渡形式,呈现出多样复杂性<sup>[15]</sup>。

### 2.3 焊接组织性能的研究

近年来,国内外针对铝合金 MIG 焊这一领域主要的研究方向是不同材料的铝合金熔化特性和焊缝金属组织性能的研究。试验研究发现,在铝合金 MIG 焊时,脉冲电流焊接优于连续电流焊接,它提高了铝合金焊缝金属的强度、塑性和疲劳寿命<sup>[16-17]</sup>。

在文献[18]中,对 AA7075 铝合金进行了恒电流气体保护焊接和脉冲电流气保焊接的研究,并采用 AA5356(AlMg<sub>5</sub>)作为填充焊丝,焊接完成后分别进行时效处理。P-MIG 焊与恒电流 MIG 焊相比,焊接区具有较高的屈服应力和强度,组织相对均匀细小。同时文献[18]中指出 P-MIG 焊的焊缝具有较高的疲劳应力,在周期外力的作用下疲劳裂纹产生的速率明显降低,疲劳寿命延长。

Stefano Maggiolino, Chiara Schmid 等人研究了铝合金 P-MIG 焊焊缝区和热影响区的防腐性。指出在铝合金 P-MIG 焊接时,高的防腐性能主要表现在热影响区,而不表现在焊缝区。他们认为在焊缝中形成了大量的气孔,而在热影响区晶界上金属间化合物沉积并且晶体长大。这两个区域具有不同的微观组织,从而呈现了不同的抗腐蚀性<sup>[19]</sup>。

Gaofeng Fu, Fuquan Tian 等人通过对 7005 铝合金 P-GMAW 焊接实验点以及采用罗森塔而模型热影响区所得到的模拟点进行对比,研究了热影响区的软化行为。当温度达到 200 °C 时,热影响区就会出现软化现象,软化原因主要是由于达到一定温度时,出现分散相和过度时效相沉积<sup>[20]</sup>。

P.K.GHOSH 研究了铝合金 5754 采用 5184 作为焊丝在 P-MIG 焊接过程中,脉冲频率、 $I_m$  与焊缝成形的关系。实验表明了脉冲频率和  $I_m$  对正面焊缝宽度和背面焊缝宽度有重要影响,但没有得出具体的对应关系。同时研究了背面焊缝宽度和正面焊缝宽度的比值和疲劳强度的影响,该比值的增加能显著提高焊缝疲劳强度<sup>[21]</sup>。

N.B.Potluri 和 P.K.GHOSH 等人用 Al-Mg(5183) 焊丝对 Al-Zn-Mg(7005) 铝合金进行 P-MIG 焊接,研究了焊缝中 Zn 含量、气孔含量和焊缝强度、拉伸应力等力学性能之间的关系。结果表明,由于焊接参数不同导致 Zn 含量和气孔含量的不同。焊缝组织中 Zn 的增加可以提高熔合区强度和拉伸应力,而气孔

数量的增加降低了熔合区强度、拉伸应力以及疲劳寿命<sup>[22]</sup>。

P.K.GHOSH 和 ARITRAK.GHOSH 等人通过调节  $\varphi$  和  $I_m$ ,研究了 Al-Zn-Mg 合金 P-MIG 焊的焊接参数对残余应力的影响。在给定相同  $I_m$  的前提下,残余应力随着  $\varphi$  的增加而减小,焊缝的几何尺寸随着  $\varphi$  的增加而增大。合理选择  $\varphi$  对减小残余应力,提高疲劳寿命有着重要的作用<sup>[23]</sup>。

J.M.Kuk, K.C.Jang 等人采用一种低温测试箱装置研究了不同氩氦成分比例的保护气体和不同焊接温度对铝合金疲劳寿命的影响,得出  $\varphi(\text{Ar})33\% + \varphi(\text{He})66\%$  能够得到最大的熔深。同时疲劳寿命随着焊接温度的降低而增加,当温度低于 -196 °C 时,疲劳强度显著增加<sup>[24]</sup>。

另外, K.C.Jang 研究了不同氩氦成分比例的保护气体和不同焊接温度对铝合金可焊性和焊接强度的影响。试验表明工件的强度受保护气体成分影响不大,不同温度条件下焊接后工件强度差别也不大,但是到达 -196 °C 时,强度明显增加<sup>[25]</sup>。

F.Lefebvre, S.Ganguly, I.Sinclair 等人研究了 2024-T351 铝合金 MIG 焊接后的微观组织结构,在熔合边界处形成了枝晶状组织,而在焊缝中心形成了均匀的等轴晶组织,同时也发现了一些时效组织和组织缺陷。文献[26]发现了在两边的热影响区分别出现了一个硬度高峰。通过实验得到的铝合金 MIG 焊的微观组织如图 5 所示<sup>[26]</sup>。

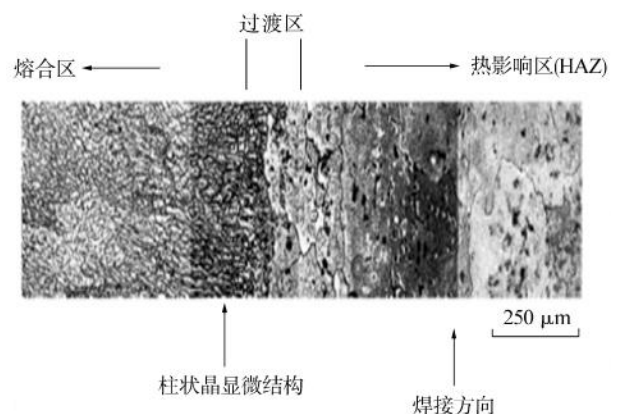


图 5 铝合金 MIG 焊的焊接区组织

高强铝铜合金也称硬铝合金,可热处理强化,具有很高的室温强度和良好的高温、超低温性能。与 2XXX 和 7XXX 相比,铝铜合金能够获得良好的焊缝成形,具有良好的焊接性。G.Padmanabham 等人对 Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zr 合金进行了脉冲 MIG 焊接的

实验,采用 2319 作为焊丝材料,对比了连续电流焊接和脉冲焊接两种工艺条件下焊接过程中熔深的差异,在相同平均电流和焊接速度的条件下,脉冲焊接得到的熔深明显较大,同时得到了 PGMW 焊接中  $I_p$ 、 $I_m$  与熔深、熔宽之间的关系<sup>[27]</sup>。

国内国旭明、杨成刚研究了单丝单脉冲和双丝 Tandem MIG 焊对高强 Al<sub>2</sub>Cu 合金焊缝组织和性能的影响。研究表明单丝复合脉冲焊接时,峰值电流周期性变化引起熔池液体强烈的搅拌作用,促进了焊缝组织的细化,提高了焊缝的强度和塑性。双丝 MIG 焊热输入高,焊接速度快,使焊缝产生了粗大的等轴晶组织,降低了焊缝的强度、硬度和塑性<sup>[28]</sup>。

## 2.4 焊接过程的控制

MIG 焊具有电弧功率大、热量集中、热影响区小、生产效率高等特点,是焊接铝合金的主要方法。国内有很多文献介绍了针对铝合金 MIG 焊接的各种控制,而国外相关的介绍较少。

Shi Yu, Zhang Yuyao 等人根据模糊控制和 ES 控制原理,设计了基于熔池宽度的视觉控制系统。通过 CCD 能够得到满意的熔池图像,利用 Fuzzy-ES 控制系统控制熔池宽度可以解决焊接过程中的多元变化所引起的焊接过程不稳定,从而保证铝合金 P-MIG 焊焊接过程的稳定性<sup>[29]</sup>。

包晔峰、殷俊等人针对铝合金脉冲 MIG 焊在不同的状态下电弧特性的不同,采用晶体管焊接电源,引入动态电子电抗器实现了焊接电源的自调节特性<sup>[30]</sup>。在此基础上,包晔峰、吴毅雄等人又设计了 GTR 开关式铝合金脉冲 MIG 焊机,该焊机选用日本三菱公司生产的 MQ600-2H GTR 模块,能够满足铝合金脉冲 MIG 焊动静特殊性的要求。

北京工业大学刘凤钢、殷树言等人<sup>[31]</sup>提出一种新的电弧控制方法,即熔滴过渡前瞬间采样电弧电压,然后提供一个表明弧长的信号,采用一定的弧长控制算法使在弧长发生变化的当前脉冲周期就得到有效的控制,实现了全电流范围内对弧长的快速稳定调节。北工大马德等人采用 MCU+DSP 双机设计出了铝合金双脉冲 MIG 数字控制系统,通过调节参数可获得理想的鱼鳞纹外观,焊接过程稳定<sup>[32]</sup>。

天津大学杨立军等人根据电弧电压值来确定电弧电流的大小,自动将电弧的电流、电压控制在亚射流过渡区内,实现了铝脉冲 MIG 焊亚射流过渡的自适应控制<sup>[33]</sup>。

近年来很多控制手段都是通过焊接过程中各类信号的采集,针对于铝合金的脉冲 MIG 焊接,也有很多学者在这方面有相关的研究。张龙、王其隆基于熔滴过渡的弧光辐射效应,将弧光辐射通量信号成功地用于铝合金脉冲 MIG 焊熔滴过渡的在线传感,实时检测铝合金脉冲 MIG 焊的熔滴过渡发生时间<sup>[34]</sup>。石玕、樊丁等人设计了铝合金熔池图像检测视觉系统获得了满意的熔池边缘图像,可以动态检测和控制熔池形状信息<sup>[35]</sup>。

## 2.5 焊接缺陷的研究

根据铝合金焊接的特性,在焊接过程中容易出现两个严重的缺陷<sup>[33]</sup>——气孔和热裂,如图 6 所示。

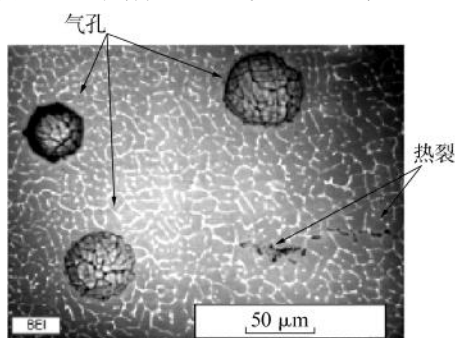


图 6 铝合金 MIG 焊接过程中的典型缺陷

由于这些缺陷的存在,降低了材料的疲劳强度和拉伸强度,影响其机械性能。普遍认为气孔的形成与铝合金焊缝中存在的氢有密切联系。热裂的主要原因是铝合金具有较大的凝固温度范围,铝合金液态熔池冷却、凝固结晶到完全形成固态是在这个温度范围内进行。在这个温度范围内同时存在着液态和固态金属,其强度、塑性都很低,所以将这个温度范围称脆性温度区。脆性温度区的存在导致了热裂现象的发生。

国内学者黄汉中分析了铝及铝合金焊接时焊接缺陷(尤其是气孔)产生的原因和防止措施,阐述了焊接缺陷的检验和返修对焊接接头性能的影响<sup>[36]</sup>。对于裂纹要控制基体金属及焊丝成分,应尽量采用加热集中的焊接方法、采用开坡口和留小间隙等。对于气孔的控制可以采用延长熔池存在时间,必须采用高纯度氩气、增大焊接电流等方法。

胡煌辉在文献<sup>[37]</sup>中认为铝及铝合金焊接时气孔缺陷的发生极其普遍,认为如何防止铝合金的焊接气孔还没有找到根本的解决办法,焊接时要注意保护气体纯度和流量、焊缝的形状和位置、焊接时焊枪的角度和喷嘴形状。

国外 F.Lefebvre 等人对 2024-T351 疲劳断裂进行了研究,采用 2319 作为填丝材料,焊接完成后,用伺服压力测试机对焊缝两头施加一定压力来进行疲劳断裂测试。实验对断裂裂纹形成、扩展以及最终断裂进行了研究,认为铝合金焊接过程中结晶裂纹缺陷比气孔缺陷更容易导致材料的疲劳断裂<sup>[38]</sup>。

为防止焊接缺陷,P.Praveen 和 P.K.D.V.Yarlagadda 等人认为减少焊件的热输入量和采用正确的焊丝可以减少裂纹的形成,而脉冲 MIG 焊接具有较低的热输入量,采用脉冲 MIG 焊接可以有效减少热裂现象的产生,但是对气孔的防止作用有限<sup>[39]</sup>。

由于铝合金焊接过程中气孔很难去除,所以很多学者对气孔作了研究。Morais 采用比重法得出不同熔滴过渡形式对 AA5052 alloy 气孔形成的影响。与其他过渡形式相比,采用脉冲过渡方式能减少气孔的形成<sup>[40]</sup>。

基于这个基础,Celina Leal Mendes da Silva 对 AA5052 进行了 DP-GMAW 和 P-GMAW 实验,比较两种焊接方法气孔形成的差异。两种焊接方法采用相同的热输入量、焊接电压,同时形成同等大小的焊缝尺寸。两种实验条件下的气孔数量分别用比重法和 X 射线来测量。实验结果表明,用 X 射线法时 DP-GMAW 法产生更多的气孔,而用比重法却发现 DP-GMAW 和 P-GMAW 法产生的气孔数量没有差异<sup>[41]</sup>。本研究认为用比重法来分析气孔更为可靠。

Celina Leal Mendes da Silva 又评估了 Vastrestraint 和 Transvastrestraint 两种焊接裂纹测试方法,如图 7 所示。

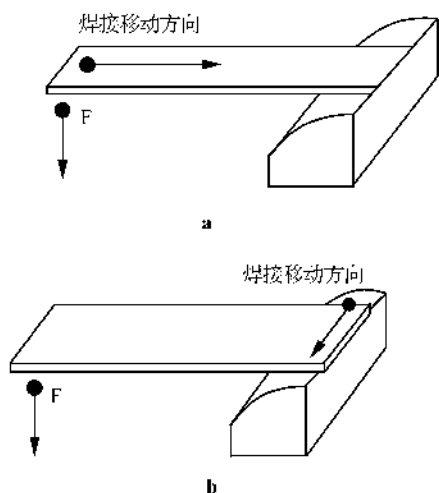


图 7 焊接裂纹测试方法

Transvastrestraint 测试法更适用于铝合金的 MIG

焊接。Celina 同时用该法对铝合金 DP-GMAW 和 P-GMAW 焊接后的工件做了对比实验,认为在相同热输入量条件下,DP-GMAW 可以有效防止铝合金焊接裂纹<sup>[42]</sup>。

### 3 结论

熔化极脉冲氩弧焊的峰值电流和熔滴过渡是间歇而又可控的,而且生产率高、易实现自动化,适合于铝合金的焊接。近年来,铝合金的 P-MIG 焊接工艺在工业化生产过程中已经得到了广泛的运用。但是由于铝独特的性能,在焊接应用中依然存在着一些问题,为了获得好的焊接质量,需要对脉冲 MIG 焊铝的工艺特点进行深入研究。深刻理解脉冲 MIG 焊铝的工艺特点、完善该技术将是一个不断探索和实践的过程。

### 参考文献:

- [1] 左敦桂,李芳,华学明,等.铝合金焊接新技术在汽车制造中的应用[J].电焊机,2007,37(7):1-5.
- [2] 张传臣,陈芙蓉.厚板高强铝合金焊接发展现状及展望[J].电焊机,2007,37(7):6-11.
- [3] Ghosh P K, Gupta P C, Gupta S R, *et al.* Pulsed MIG welding of Al-Zn-Mg alloy[J]. Mater. Trans. JIM, 1990, 31(8): 723-729.
- [4] Shah S R, Wittig J E, Hahn G T. Proc. 3rd Int. Conf. on Trends in welding research[C]. Gatlinburg: ASM International, 1992.
- [5] Ghosh P K. An analysis of weld characteristics as a function of pulse current MIG welding parameters[J]. Int. J. Join. Mater. 1996, 8(4): 157-161.
- [6] Ghosh P K, Dornb L, Marc Hubner, *et al.* Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 194(1-3): 163-175.
- [7] Ghosh P K, Gupta S R, Gupta P C, *et al.* Influence of pulsed current welding on the microstructure and porosity content of Al-Zn-Mg alloy weldment[J]. Pract. Metallography, 1990(27): 613-626.
- [8] Lin Sanbao, Gang Tie, Yang Chunli, *et al.* An initial study on welding procedure using tandem MIG welding of high strength aluminum alloy[J]. CHINA WELDING, 2004, 13(2): 81-85.
- [9] 杭争翔,殷树言,白韶军. AC PMIG 焊接铝合金的电弧形态及熔滴过渡特征[C]. 北京: 2003 汽车焊接国际论坛论文集, 2003.
- [10] Ghosh P K, Gupta P C, Gupta S R, *et al.* Pulsed MIG welding of Al-Zn-Mg alloy[J]. Mater. Trans. JIM 1990, 31(8): 723-729.
- [11] Ferraresi V A, Figueiredo K M. Metal Transfer in the Aluminum Gas Metal Arc Welding[J]. J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci.



- & Eng., 2003, XXV(3): 229–234.
- [12] SUBRAMANIAM S, WHITE DR, JONES JE, *et al.* DW LYONS  
Welding journal, American Welding Society, 1998, 1111(77):  
458–464.
- [13] 廖平, 黄鹏飞, 卢振洋, 等. 铝合金 VPPMIG 焊电弧过零  
稳定性[J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 13–16.
- [14] Ghosh P K, Goyal V K, Dhiman H K, *et al.* Thermal and  
metal transfer behaviours in pulsed current gas metal arc weld  
deposition of Al–Mg alloy[J]. Science and Technology of Welding  
and Joining, 2006, 11(2): 232–242.
- [15] 于景宝. 高速双丝铝合金气体保护焊接工艺方法和熔池  
过渡行为研究[D]. 江苏: 南京理工大学, 2006.
- [16] Rioja R J. Mater. Sci. Eng., 1998, A257: 100–107.
- [17] Potluri N.B, Ghosh P.K, Gupta P.C, *et al.* Studies on weld metal  
characteristics and their influence on tensile and fatigue properties  
of pulsed current GMA welded Al<sub>2</sub>Zn<sub>2</sub>Mg alloy[J]. Welding  
Journal, 1996, 75(2): 62–70.
- [18] Balasubramanian, Ravisankar V, Madhusudhan Reddy G.  
Influences of pulsed current welding and post weld aging treatment  
on fatigue crack growth behaviour of AA7075 aluminium alloy  
joints[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 30(3): 405–416.
- [19] Stefano Maggolino, Chiara Schmid. Corrosion resistance in FSW  
and in MIG welding techniques of AA6XXX[J]. Mater. Process.,  
Tech., 2008, 197(1): 237–240.
- [20] Gaofeng Fu, Fuquan Tian, Hong Wang. Studies on softening  
of heat-affected zone of pulsed-current GMA welded Al–Zn–  
Mg alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006,  
180(1–3): 216–220.
- [21] GHOSH P K, GUPTA S R, GUPTA P C, *et al.* Fatigue characteristics  
of pulsed MIG welded Al–Zn–Mg alloy[J]. Journal of Materials  
SCIENCE, 1991, 26(22): 6161–6170.
- [22] Potluri N.B., Ghosh P.K., Gupta P.C., *et al.* Studies on weld  
metal characteristics and their influence on tensile and fatigue  
properties of pulsed-current GMA welded Al–Zn–Mg alloy[J].  
International Journal of Fatigue, 1997, 19(8): 660–660.
- [23] GHOSH P K, ARITRA K. GHOSH. Control of Residual Stresses  
Affecting Fatigue Life of Pulsed Current Gas–Metal–Arc Weld  
of High-Strength Aluminum-Alloy[J]. METALLURGIC–AL  
AND MATERIALS TRANSACTIONS, 2004, 35(8): 2439–2444.
- [24] Kuk J M, Jang K C, Lee D G, *et al.* Effects of temperature and  
shielding gas mixture on fatigue life of 5083 aluminum alloy[J].  
Journal of Materials Processing Technology, 2004(155–156):  
1408–1414.
- [25] Jang K C, Lee D G, Kuk J M, *et al.* Welding and environmental  
test condition effect in weldability and strength of Al alloy[J].  
J. Mater. Process. Tech., 2005(164–165): 1038–1045.
- [26] Lefebvre F, Ganguly S, Sinclair I. Micromechanical aspects  
of fatigue in a MIG welded aluminium airframe alloy Part 1.  
Microstructural characterization[J]. Materials Science and  
Engineering A, 2005(397): 338–345.
- [27] Padmanabham G, Pandey S, Schaper M. Pulsed gas metal arc  
welding of Al–Cu–Li alloy[J]. Science and Technology of Welding  
and Joining, 2005, 10(1): 67–75.
- [28] 国旭明, 杨成刚, 钱百年, 等. 高强 Al–Cu 合金脉冲 MIG 焊  
工艺[J]. 焊接学报, 2004, 25(4): 5–9.
- [29] Shi Yu, Zhang Yu yao, Fan Ding, *et al.* Development of a Visual-  
Based Welding Pool Width Control System for Al–P–MIG  
Welding Process[J]. Robot. Weld. Intellige. & Automation,  
2007, (362): 267–273.
- [30] 包晔峰, 殷俊. 铝合金脉冲 MIG 焊自调节动特性研究[J].  
铁道车辆, 1998, 36(4): 17–18.
- [31] 刘凤钢. 单片机控制铝合金脉冲 MIG 焊接设备与工艺的  
研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
- [32] 马德. 数字控制铝合金双脉冲 MIG 焊工艺的研究[D]. 北  
京: 北京工业大学, 2005.
- [33] 杨立军, 张健, 李志勇, 等. 铝脉冲 MIG 焊亚射流过渡的  
自适应控制[J]. 焊接学报, 2007, 28(4): 93–95.
- [34] 张龙, 王其隆. 铝合金脉冲 MIG 焊熔滴过渡的弧光传  
感[J]. 焊接学报, 1998(12): 136–141.
- [35] 石珩, 樊丁. 形态学方法在铝合金 MIG 焊熔池图像信  
息提取中的应用[J]. 焊接学报, 2005, 26(3): 37–40.
- [36] 黄汉中. 铝及铝合金焊接中常见焊接缺陷及其对策[J]. 石  
油化工设备技术, 1997, 18(5): 51–56.
- [37] 胡焯辉. 铝合金 MIG 焊时气孔的预防[J]. 电力机车与城轨  
车辆, 2006, 26(3): 41–42.
- [38] Lefebvre F, Sinclair I. Micromechanical aspects of fatigue in  
a MIG welded aluminium airframe alloy, Part 2. Short fatigue  
crack behaviour[J]. Materials Science and Engineering A, 2005,  
(A407): 265–272.
- [39] Praveen P, Yarlalagadda P K D V. Meeting challenges in welding  
of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding[J].  
Journal of Materials Processing Technology, 2005(164): 1106  
–1112.
- [40] Morais F C. Influence of operational factors on porosity formation  
in aluminum MIG welding[C]. Brazil: Federal University of Uber  
landia, 2001.
- [41] Celina Leal Mendes da Silva, Am'ericco Scotti b. The influence  
of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW[J].  
Journal of Materials Processing Technology, 2006(171): 366–  
372.
- [42] Celina Leal Mendes da Silva, Am'ericco Scotti. 2. Performance  
assessment of the (Trans)Varestraint tests for determining  
solidification cracking susceptibility when using welding processes  
with filler metal[J]. Meas. Sci. Technol., 2004(15): 2215–2223.