

# 铝合金激光焊接技术进展

Development of Laser Welding Technology for Aluminium Alloy

中国船舶重工集团公司第七二五研究所 张文毓



张文毓

毕业于西北工业大学金属材料及其热处理专业,高级工程师。现主要从事情报研究工作。

铝及其合金因具有良好的耐腐蚀性、导电性、导热性和高的比强度而广泛应用于工业领域,在产量上是仅次于钢铁的第二类金属材料。近年来,随着铝合金在汽车、造船、国防、航空航天、娱乐和体育器材等制造领域越来越广泛的运用,铝合金焊接技术也在突飞猛进地发展,其表现可归为3方面。其一,基于对传统焊接技术的改进和创新而出现的新型铝合金焊接技术,如低频调制型脉冲MIG焊、交流MIG焊、双焊枪

应用普遍的脉冲MIG、TIG焊会随着微处理器(MCU)和数字信号处理芯片(DSP)为核心的全数字化焊机的不断进步而使更多以前只停留在铝合金焊接理论上的技术变为现实。激光焊、激光-电弧复合焊、双束激光焊是近年发展起来的焊接铝合金的新工艺。

TIG焊、穿孔型等离子弧立焊等;其二,高能密度焊接技术在铝合金焊接领域的进一步推广和应用,如电子束焊、YAG激光焊等;其三,搅拌摩擦焊在铝合金焊接领域中的出现<sup>[1]</sup>。

## 铝合金焊接的特点

铝合金由于重量轻、比强度高、耐腐蚀性能好、无磁性、成形性好及低温性能好等特点而被广泛地应用于各种焊接结构产品中,采用铝合金代替钢板材料焊接,结构重量可减轻50%以上。

铝合金焊接有几大难点:

(1) 铝合金焊接接头软化严重,强度系数低,这也是阻碍铝合金应用的最大障碍;

(2) 合金表面易产生难熔的氧化膜( $Al_2O_3$  其熔点为 $2060^\circ C$ ),这就需要采用大功率密度的焊接工艺;

(3) 铝合金焊接容易产生气孔;

(4) 铝合金焊接易产生热裂纹;  
(5) 线膨胀系数大,易产生焊接变形;

(6) 铝合金热导率大(约为钢的4倍),相同焊接速度下,热输入要比焊接钢材大2~4倍。

因此,铝合金的焊接要求采用能量密度大、焊接热输入小、焊接速度高的高效焊接方法<sup>[2]</sup>。

## 铝合金激光焊接技术

目前,生产中常用MIG焊、TIG焊方法来焊接铝合金材料。虽然使用这2种方法能够得到良好的焊接接头,但是,这2种方法却有熔透能力差、焊接变形大、生产效率低等缺点。近年来,很多科技工作者开始探讨焊接铝合金的新方法,如激光焊、双光束激光焊、激光-电弧复合焊及摩擦搅拌焊等,下面主要介绍前3种焊接方法的主要特点<sup>[3]</sup>。

2009年第16期·航空制造技术 47

## 1 铝合金的激光焊

随着大功率、高性能激光加工设备的不断开发,铝合金激光焊接技术发展很快,是未来焊接铝合金的主要发展方向之一。目前,铝合金激光焊接已经被使用在车体部件的连接上,在 Audi A2(全铝结构)上,就有 30m 激光焊缝。

与传统的 TIG、MIG 焊相比,用激光来焊接铝合金具有以下优点:

(1) 能量密度高,热输入量小,焊接变形小,能得到熔化区和热影响区窄而熔深大的焊缝。

(2) 冷却速度快,能得到组织细微的焊缝,故焊接接头性能良好。

(3) 焊接速度快、功能多、适应性强、可靠性高且不需要真空装置,所以在焊接精度、效率、自动化等方面具有无可比拟的优势。

激光焊接是一种高能密度的焊接工艺,焊接铝合金可以有效防止传统焊接工艺产生的缺陷,强度系数提高很大。但激光器功率一般都比较低,对铝合金厚板焊接困难,同时铝合金表面对激光束的吸收率很低,以及要达到深熔焊时存在阈值问题,所以工艺上有一定难度<sup>[4]</sup>。

## 2 铝合金的激光-电弧复合焊

虽然用激光焊接铝合金有许多优势,但仍存在较大的局限性,如设备成本高、接头间隙允许度小、工件准备工序要求严等。为了更有效地焊接铝合金,人们发展了激光-电弧复合焊接工艺。激光-电弧复合主要是激光与 TIG 电弧、MIG 电弧及等离子体的复合。目前,该工艺在德国和日本等发达国家研究比较多,并在汽车业中已有一定的应用,如大众汽车公司的 Phaeton 前门上就有 48 处激光-MIG 焊道,而且激光复合焊还可以用来焊接车体及轮轴。不过国内在该工艺的研究和应用上基本还是空白。

铝合金激光-电弧复合焊很好地解决了激光焊接的功率、铝合金表

面对激光束的吸收率以及深熔焊的阈值问题,是极具前景的铝合金焊接工艺之一,目前工艺还不成熟,处于研究探索阶段。

用激光和电弧复合焊接方法来焊接铝合金时,激光与电弧相互影响,可以克服单用激光或电弧焊方法自身的不足,产生良好的复合效应。能显著提高焊接效率,这主要基于 2 种效应:一方面是高的能量密度导致了高的焊接速度;另一方面是 2 种热源同时作用在一个相同区域的叠加效应。这种复合工艺的优势很多,潜力很大,在未来的汽车生产中必将具有广泛的应用前景<sup>[5]</sup>。

## 3 铝合金的双光束激光焊

激光单独焊接铝合金时会产生由于钥孔塌陷而产生的气孔。针对这个问题,人们又研究了双束激光焊,发现双束激光焊有相对较宽的焊宽和较低的焊缝深宽比,能提高钥孔的稳定性,可以明显地降低气孔敏感性。其原因在于双束激光焊接时第一束激光产生熔池,并对附近区域进行预热,累积的热量使第二束激光照射该处时,可以熔化更多的母材,从而形成较宽的焊缝。此外,由于第二束激光可以把第一束激光形成的钥孔后壁气化,避免了钥孔的塌陷,所以形成气孔的几率就要小一些<sup>[6]</sup>。

## 铝合金激光焊接技术的应用

### 1 铝合金激光焊接技术在舰船建造中的应用

铝合金材料由于密度小,重量轻,它能够最大限度地减轻船舶的重量,降低船舶的重心,提高船舶的稳定性。因此在一些小型船舶(如渔船、游艇、舰艇)上得到广泛的应用。

经过近几年的发展, MIG 焊从焊接设备、焊接材料到焊接工艺,都日益走向成熟,获得高质量的 MIG 焊缝已经成为可能。目前,国外铝合金焊接 90% 以上采用 MIG 焊。国内的铝合金 MIG 焊技术也得到了迅

速的发展。针对船用铝合金的焊接以及 MIG 焊显现出的突出优点,研究并提出成熟的铝合金 MIG 焊工艺将为铝合金在船舶建造上的应用提供有力的保证。

造船业是激光焊接应用的一个重要领域,造船的主要工艺是焊接,采用激光焊接的优点在于可得到高强度的焊件,从而在设计上可减小所用材料的厚度,达到轻重量、高强度的目标。美国经计算得出航空母舰如采用激光焊接技术制造可减轻重量 200t。实际上当前欧洲的一些大型游轮的建造中,激光焊接的应用达到 20% 左右,近期目标达到 50%。此外,海洋平台、潜艇的结构件还有许多激光焊接的例子。

### 2 铝合金焊接技术在汽车生产中的应用

减轻汽车重量以降低能耗、减少污染、提高燃油效率,这是解决汽车节能和环保问题的最有效的措施。实现汽车轻量化的方法主要有修改结构设计、缩小汽车规格和采用新型材料。其中采用轻型的结构材料是最有潜力的一种方法。由于铝合金具有高比强度、耐锈蚀、热稳定性好、易成形、再生性好和简化结构等一系列优点,能满足汽车工业的上述要求,故在汽车业中倍受青睐。大量的对比研究和反复实践证明,选用铝合金材料是实现汽车轻量化的有效途径。铝合金在汽车中的应用不仅带来明显的减重效益,并且能提高燃油效率、减少尾气排放、改善汽车的动力性能等,带来巨大的经济效益和社会效益。

目前,适合汽车用的铝合金主要有 Al-Mg(5000 系列)、Al-Mg-Si(6000 系列)及 Al-Mg-Zn(7000 系列)三大系列,这 3 类合金各有特点,用在汽车的不同部位。一般,汽车外壳多用耐蚀可焊的 5000 系合金,而梁柱等强度要求较高的部位则用 6000 系或 7000 系合金。由于铝

合金较活泼、导热导电性好、线膨胀系数大,焊接时常会有气孔、裂纹、咬边、焊缝成形差等缺陷出现,并且焊后接头力学性能下降。为了实现汽车生产中高的生产率和高的焊接质量相容性的要求,提高铝合金的焊接技术、开发和应用新的焊接方法对铝合金在汽车中的广泛应用具有重要的意义,这也是真正实现汽车轻量化的技术关键之一。

为了实现汽车轻量化,解决节能、环保等问题,铝合金在汽车中的应用不断增加,这是汽车发展的趋势,也是社会发展的需求。由于铝合金的物理化学性能特殊,焊接时有一定困难,很大程度上制约了铝合金在汽车中的广泛应用。提高铝合金的焊接技术、开发和应用新的焊接方法是提高汽车铝化率所必须攻克的技术关键之一。其中激光焊、激光-电弧复合焊、双光束激光焊及摩擦搅拌焊就是近年发展起来的焊接铝合金的新工艺,在国外轿车生产中已有了一定的应用。随着这些焊接方法的不断成熟,必定为铝合金在汽车中的应用提供更坚实的技术支撑,也为我国汽车铝合金化程度的进一步提高提供了宝贵的借鉴和经验。

奥迪、奔驰、大众、沃尔沃等欧洲的汽车制造厂早在20世纪80年代就率先采用激光焊接车顶、车身、侧框等钣金结构,90年代美国通用、福特和克莱斯勒公司竞相将激光焊接引入汽车制造,尽管起步较晚,但发展很快。意大利菲亚特在大多数钢板组件的焊接装配中采用了激光焊接,日本的日产、本田和丰田汽车公司在制造车身覆盖件中都使用了激光焊接和切割工艺,高强度激光焊接装配因其性能优良在汽车车身制造中使用得越来越多。

激光焊接还广泛应用到变速箱齿轮、半轴、传动轴、散热器、离合器、发动机排气管、增压器轮轴及底盘等汽车部件的制造,成为汽车零部件制

造的标准工艺。应当看到我国一些汽车制造厂家已经在部分新车型中采用激光焊接技术,而且从激光焊接技术本身研究的角度看,我国一些科研院所一些具有特色的领域取得了具有特色的成果。随着我国汽车工业的快速发展,激光焊接技术一定会在汽车制造领域取得丰硕的成果和广泛的应用。

### 3 铝合金焊接技术在航天工业中的应用

铝合金因其特性已成为在航天工业中应用最广泛的一类有色金属结构材料。例如,铝合金是运载火箭及各种航天器的主要结构材料。美国的阿波罗飞船的指挥舱、登月舱,航天飞机氢氧推进剂贮箱、乘务员舱等也都采用了铝合金作为结构材料。我国研制的各种大型运载火箭也广泛选用了铝合金作为主要结构材料。

航天技术的发展对铝合金的强度和减重提出了更高的要求,铝锂合金在近几十年得到了迅猛的发展。因为每加入1%的Li,可使铝合金质量减轻3%,弹性模量提高6%,比弹性模量增加9%,这种合金与在飞机产品上普遍使用的2024和7075合金相比,密度下降7%~11%,弹性模量提高12%~18%。前苏联的1420合金与广泛使用的杜拉铝(硬铝)II16(2024)合金相比,密度下降12%,弹性模量提高6%~8%,抗腐蚀性好,疲劳裂纹扩展速率低,强度、屈服强度和延伸率相近、焊接性较好。

铝合金是航天产品的主要结构材料之一。随着材料技术的发展,铝合金家族不断壮大。在美国和俄罗斯,2219、1201、1420铝合金都已获得了广泛的应用,2195铝合金也已开始应用。在国内,S147和2195等在未来航天型号中的应用前景不容忽视。载人航天和可重复使用航天器对焊接结构的可靠性提出了更高的要求。随着这一进程的出现,新焊

接技术在航天工艺焊接生产中的应用必将获得突飞猛进的发展,焊接自动化和高的质量及可靠性保证能力将是21世纪对焊接技术的基本要求。尤其是铝合金中厚板和厚板焊接技术在近几年将成为航天焊接工作者研究和推广的热点之一<sup>[17]</sup>。

美国在20世纪70年代初的航空、航天工业中就已利用15kW的CO<sub>2</sub>激光器针对飞机制造业中的各种材料、零部件,进行焊接试验、评估工艺的标准化。在欧盟国家中,意大利首先于20世纪70年代末从美国引进15kW的CO<sub>2</sub>激光器,随后由联盟对航空发动机、航天工业中的各种容器及轻量级结构立项,开展了长达8年的激光焊接应用研究。材料涉及钛合金、镍基、铁基高温合金等。近年来新的应用成果是铝合金飞机机身的制造,用激光焊接技术取代传统的铆钉,从而减轻飞机机身的重量近20%,提高强度近20%,此项技术计划用于空中客车318、380以及一些无人驾驶飞机的制造。

### 结束语

铝合金焊接技术作为铝合金在工业领域中扩大应用的关键技术之一,必然会得到进一步的发展。其中应用普遍的脉冲MIG、TIG焊会随着微处理器(MCU)和数字信号处理芯片(DSP)为核心的全数字化焊机的不断进步而使更多以前只停留在铝合金焊接理论上的技术变为现实。激光焊、激光-电弧复合焊、双光束激光焊是近年发展起来的焊接铝合金的新工艺,新兴的搅拌摩擦焊一出现就显示了其焊铝的巨大优势,不久以后很可能会代替MIG焊,承担大部分铝合金焊接工作量<sup>[18]</sup>。

本文有参考文献8篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 依然)