国外焊接技术最新进展情况（五）

中国机械工程学会 （北京 100037） 丁培璠译

编者按：由于本刊第8、9、10均为特划策别专辑，所以本连载文章暂停了三期。从第11期起，继续刊登此连载文章，请广大读者准时收看。

十五、非铁金属的焊接

1. 铝合金的焊接

由于铝合金具有优越的材料特性：如低密度（2.7g/cm^3），高强度（70～700MPa），对多种介质的高抗腐蚀能力，低温韧性，无磁性，无毒有益于健康等，因而具有广泛的应用前景。铝材的电弧焊接时，保护气体成分的选择是影响焊接结果的主要因素。在氩气中提高氦气的比例，将难以起弧，电弧不稳，但却可以增加熔深。通过研究，发现许多影响因素，例如：加氦混合可加大熔深，加入甲烷导致气孔产生，加入氯气可以获得平滑而光亮的焊道。比较氧、氢和CO_2的混合气体的试验表明，只有氢气会引发气孔的产生。

采用脉冲频率在2～6kHz范围之间的脉冲钨极氩弧焊可以使电弧更加集中，因此可以改善熔深。这种增加熔深的效应可以用于高焊速，也可以焊接薄板材。这种焊接工艺可以用来焊接铝、铜、镍和钛及其合金，采用氩氢、氩氦混合气可以增加熔深。

借助于智能控制的转接器，反极性交流钨极氩弧焊可以不采用高频起弧，在一定的场合也可以稳定地工作。即使对于可达性差的铝合金零件，焊接工作也可以顺利进行，不会出现任何半波缺失造成的缺陷。焊接过程稳定一致，无飞溅。

在压力容器和承压管道的制造中，对纵向焊缝的质量有严格的要求。直流TIG焊接工艺是高质量焊接这种纵向焊缝的经济、有效的方法。此焊接工艺已经用于外径在324～1500mm，壁厚在3～10mm管道的制造中。采用的填充焊丝成分与母材相同或者合金成分略高（EN AW Al99.5的母材，用SG－Al99.5Ti；ENAW AlMg3用SG－AlMg4.5Mn；EN AW AlMg4.5Mn0.7用SG－AlMg4.5Mn），焊接时采用氦气作为保护气体。

另外，还对铝合金零件的焊接变形进行了比较和计算研究，电弧焊接时产生的收缩区的范围可以用计算的方法来预估。最初是采用有限元方法来模拟焊接过程进行研究的，焊接是在天然时效硬化的AlMg3锻造铝合金板材上采用TIG平铺焊进行的。此外工业应用良好的AlMgSi0.7铝材被用来研究如何应用简单的工程计算方法，来预估实际零件的横、纵向变形。

在分析研究的基础上推出了氧当量计算公式，以便评价钛合金材料上进行钨极氩弧焊时氧、氮、碳、铁对焊道金属强度、伸长率和硬度的影响。这种公式适于估价合金元素和冷却速度对纯钛焊道性能的影响。

与常用的脉冲电弧焊接工艺相比，交流脉冲MIG焊接工艺可以为采用ϕ1.2mm焊丝焊接板厚小于1mm的铝合金板材，提供改善热输入和控制焊接过程电弧压力的可能性，并给出了各种焊接电流波形对焊接结果的影响。这种工艺的突出优点是几乎没有变形，焊接速度高，较好的搭连接缝隙的能力和维弧电流负半周比例较低。

实践证明，脉冲金属极气体保护焊接适宜制造5083铝合金的高速渡船，通过进一步的开发，将适宜焊接厚度从2.5～75mm以上的板材。

文献中详细介绍了焊接钛合金的脉冲金属极气体保护焊接的控制技术。该控制技术可以确保每一个脉冲产生一个熔滴过渡。

在对2219铝合金进行金属极气体保护焊接时，发现在凝固的焊道起始端为缺铜的α相（铜的质量分数为2%～3%），在结尾出现富铜的共晶混合体（w_{Cu}大约55%）。通常的共晶混合体的铜含量w_{Cu}=33%，α相是塑性的，共晶混合体则比较脆。在对2219铝合金的MIG焊接时，还对部分熔化区的晶界和晶粒内部的凝固过程进行

了进一步深入研究。

板极金属极气体保护焊接的特点是良好的搭接间隙的能力和使用高密度电流。这样就可以在很宽的应用领域经济而有效地完成各种焊接任务，特别要指出的是适宜焊接很薄和很厚的铝合金板材。

焊接 AlSiMg 和 AlMg4.5Mn0.7 铝合金制造的 ICE 列车 25m 长的底板、侧面板和顶板时，采用了双丝金属极气体保护焊工艺，平均焊速可以达到 1.2～1.8m/min，焊接过程稳定，焊接质量可靠。这个焊速是迄今为止采用的单丝焊接过程焊速的 2～3 倍。此外，对于 8mm 厚的截面一次焊接就可以完成，而单丝焊接时需要 2～3 道焊缝。焊接保护气体是氩气或者 50% Ar + 50% He 附加 150×10^{-6}氮气，焊丝材料是 AlMg4.5MnZr。

另外，铝合金前后排列多丝焊在容器、车辆和列车制造的几乎所有焊接任务中已经成为单丝焊的补充，甚至经常是取而代之。多丝焊与单丝焊相比，焊速可以增加 50%以上。通常可以说，在同样的生产条件下，根据零件的不同，在焊接铝合金的情况下采用前后排列的多丝焊接可以节约生产成本 30%～50%。

为制造铝合金的汽车零件（车门框架、车门和座椅）需要特种金属极气体保护焊接工艺。从强度观念出发，焊接用填充材料推荐使用含镁的铝合金；对于要求焊道美观的场合，推荐使用含硅的焊丝。焊接过程采用氩气作为保护气体，使用脉冲焊接电流。在熔化焊接情况下，不仅焊接的几何和冶金性能，而且过程参数（焊接速度、熔敷率）主要依赖于单位能。借助于焊枪耦合的局部感应加热，可以有选择地改变加热条件，以便在消耗电极电弧焊接过程中达到质量和经济性的要求。

等离子－MIG 焊接工艺可以用于焊接 4～6mm 厚的 AlMg4.5Si0.5 板材，不需要限定焊接位置（平焊、横焊）。在送丝速度达到 20m/min（填充焊丝：AlMg4.5Mn）时，可以达到高熔敷率。但是，对于对接接头必须确保接头间隙或做好坡口准备，以便提供焊丝过渡的容积。板厚小于 2mm 只有采用脉冲 MIG 技术和最小等离子电流，才可以获得生产上可重复的焊道。

采用焊丝正极性和大电流等离子焊弧接铝零件时，可以获得高效率和高质量的接头。对多种铝镁合金（AlMg2.7Mn，AlMg3，AlMg4.5Mn，AlMgSi0.5）进行的试验表明，采用 AlMg3 和 AlMg5 作填充材料（焊丝直径 1.2mm），焊接电流 100～200A，可以顺利地完成板厚为 2～8mm 的焊接，还可以形成锁孔效应。

与 TIG 和 MIG 电弧相比，等离子射流的特点是高能量密度，因此，对于正常位置的对接接头可一次焊透大约 8mm，焊速可以达到1m/min。交流等离子弧焊接产生锁孔效应的板厚下限是 1mm，采用正极性时，板厚下限是 2mm。交流等离子弧焊接还适宜角焊缝和搭接接头的手工焊和机械化焊接。用等离子焊接铝板材（AlMg 合金）时，不易产生气孔和未熔合缺陷。

铝合金焊接结构的修复工作是非常困难的，这是因为采用的铝合金的多样性，需要个别研究和处理。

2．二极管激发的固体激光器焊接

二极管激发的固体激光器焊接 AlMg3 确定的优化参数窗口。激光焊接允许参数的变化范围较宽，这为设计提供了一定的自由度，特别是在车辆制造业中面临着多种形式的焊接接头（对接、角接）。对于 AlMg3，采用 3kW 连续激光功率，焊速为 3m/min 时，熔深可以达到 4mm。

文献中还介绍采用激光焊接车辆壳体的例子：车体材料为 AlMg3.5Mn（板材厚度为 1.2mm）时，采用了最大连续功率达 4kW 的 Nd:YAG 激光束，焊缝长度为 1.4m，焊丝材料：AlMg4.5Mn，直径 1.0mm。通过添加焊丝和平行提供惰性保护气体可以稳定焊接过程，焊道内外质量和成形良好。二极管激发的 Nd:YAG 激光器的使用拓宽了焊接铝合金的应用范围，开拓了复合焊接过程的产生和发展。在焊接铝合金时特别重要耦合条件，可以通过高质量激光束和激光的足够功率得到改善。

从冶金观点来看，采用填充材料对拓展技术的应用前景是有利的，采用混合焊接技术将更加有利。前面介绍过的金属极气体保护焊接与激光焊接的组合，最初是在铁路车辆制造中使用的。

3．非真空电子束焊接

非真空电子束焊接在许多应用领域已经被证明是一种大批量生产使用的技术。这种工艺不仅代替了常用的焊接技术，而且为 0.5～5mm 厚的板材提

供了一种质量高、经济有效的焊接接头的优选方法。特别要强调的是高精度、高可重复性、热输入小而熔深大，易于组织在生产线中，由于不需要抽真空，因而易于操作。AZ31B 锻造合金和 AM50A，AZ91D，AE42 和 AS21 压铸合金，当厚度在 1.3～10.0mm 是可以用来焊接的镁合金。按照母材的不同可以选择 AZ61A，AZ92A 合金作为填充焊丝，焊丝直径为 1.6mm。此外，资料还介绍了高速焊接 1mm 厚 AlMg5Mn 和 AlMg0.4Si1.2 合金（填充焊丝是 AlMg4.5Mn）的方法。

另外，对镁合金（AM50、AM60 和 AZ91）的非真空电子束焊接时，由于铸造的条件不同，这些合金的气孔含量不同，因而具有不同的强度。即使采用了填充金属，在焊接接头中也不可避免地含有气孔。

4．镁合金的焊接

仔细选择焊接和连接条件，采用含气量低的镁合金母材，可以对镁合金进行金属极气体保护焊、摩擦焊、电阻焊和激光焊接，以制造高质量和成形良好的焊接结构。焊接结果可以和铝合金材料相比较。但是，经验表明模铸材料含气体过多。此外，为了能够灵活地进行高效率 MIG 焊接，要采取严格的设定参数，对焊丝质量要求很严。

在对镁合金进行金属极气体保护焊接时决定意义的将合适的能量输入到填充焊丝上，必须适当地调节能量，以使焊丝熔化而不气化。文献介绍了板厚为 1.35～2.5mmAZ31 和 AZ61 挤压和轧制板材的焊接技术，填充焊丝采用与母材相同或者略高于母材的合金成分，焊丝直径为 1.2mm。焊接接头的静强度为母材的 80%～100%，而弯曲角为母材的 60%。

对 AM60B 挤压合金进行激光焊接时，主要问题是焊缝金属中增加了气孔。随着热输入的增加，即激光功率的提高和焊速的降低，气孔也增加。对焊道进行可控制的重熔将消除气泡，减少孔洞。

5．微焊接技术

文献中详细地描述了在电子、电工技术和微机械中使用的微焊接技术（例如：微电阻焊接、微等离子焊接、微电子束焊接、热压焊接、超声波微焊接及热声波微焊接），同时还介绍了相应焊接过程中典型的优、缺点。与这些焊接方法比较，对激光束微焊接还特别举出应用实例和在微焊接技术中的相应的前景。

对于焊接具有绝缘层的铜导线，与其他常用的焊接过程相比，超声波焊接有明显的优点。在高频振动作用下涂釉层将被机械地破坏并从焊接区去除，这是特别有益的。除去绝缘层和材料之间的焊接过程在一个工序中同时完成。对于许多市场上销售的涂釉质量和不同的铜基接触材料（直径在 0.3～2.0mm），都能够进行生产形焊接性试验。

文献中还介绍了镍－钛形状记忆合金与高合金钢的超声波焊接、电阻焊接、摩擦焊接和激光焊接的适宜性。借助于机械技术、截面显微观察、金相和电子显微镜观察，可以评估焊接质量。这方面的一个例子是用相同材料焊接的结果来作为 NiTi－钢接头的比较和参考。对于同种材料的电阻压焊和摩擦焊接，采用热测量和拉伸试验来评估焊接过程对 NiTi 形状记忆合金性能的影响。

扩散连接非常适宜光学石英和金属、压电陶瓷之间、压电陶瓷与氧化铝陶瓷或者与铬镍钢之间的焊接。在接头区，被焊零件表面用金、铜、银金属化。选择合适的中间层（InPb15Ag5，Pb15Ag5，Sn96Ag4 和 Bi50Pb25Sn12.5）和合适的焊接参数，就能够在温度敏感材料之间形成金属间的结合。

6．摩擦焊接的新发展

文献中介绍了摩擦焊接的新发展和各种不同的焊接方法，以及它们的优、缺点。例如，搅拌摩擦焊接非常适宜金属泡沫材料与常用的钢材之间的焊接，这些泡沫材料大多是铝或者铝合金制成的。此外，还可以焊接非泡沫的夹层板和随后使之加工成泡沫结构。

另外，还介绍了 2195 铝合金进行搅拌摩擦焊接后和进行了适当热处理后的微观结构的研究结果。热处理将导致搅拌区的密度降低，晶粒内和沿着晶界析出第二相；同时还介绍了 AA2024－T3，AA7075－T7351 铝合金搅拌摩擦焊接接头的应力－应变曲线和硬度的测量结果。搅拌摩擦焊焊接用于航空工业中的 2024－T3 和 7075－T6 铝合金的搭接接头，研究了接头力学性能与焊接速度和工具转速的关系。

待续　（20040812）