

空空导弹弹体制造中的先进焊接技术

Technology of Advanced Welding Technology in Air-to-Air Missile Body Manufacture

中航工业空空导弹研究院 樊兆宝 安绍孔 王英健 桑胜盈



樊兆宝

中航工业空空导弹研究院研究员,国际焊接工程师,首席专家。1982年毕业于西北工业大学,主要从事焊接工艺技术工作,曾获部级成果二等奖2项、三等奖1项,荣立部级三等功2次,发表论文30余篇。

焊接就是通过加热或加压,或两者并用,有时还采用填充材料,使焊件达到原子间结合的一种加工方法。焊接技术在空空导弹弹体的制造工艺中占有重要地位。目前,空空导弹

目前,空空导弹弹体中几乎所有的重要部件,包括动力部件壳体、各舱段壳体、舵面和翼面等,都是通过焊接组合而成的。先进焊接技术的采用还使以前认为无法进行加工的焊接结构和难以接近的焊接部位得以实现可靠的焊接,这对新一代先进空空导弹的研制开发起到了重要的促进作用。可以毫无夸张地说,没有先进焊接技术作为支撑,就没有现代空空导弹弹体结构的发展。

弹体中几乎所有的重要部件,包括动力部件壳体、各舱段壳体、舵面和翼面等,都是通过焊接组合而成的。先进焊接技术的采用还使以前认为无法进行加工的焊接结构和难以接近的焊接部位得以实现可靠的焊接,这对新一代先进空空导弹的研制开发起到了重要的促进作用。可以毫无夸张地说,没有先进焊接技术作为支撑,就没有现代空空导弹弹体结构的发展。

空空导弹弹体的焊接特点

1 焊缝质量要求严格

由于在飞行过程中空空导弹的

弹体不但要承受很大的纵向和横向过载,而且动力部件壳体还要承受高速气流的冲击和火药燃烧时高温高压的恶劣环境,这就对其焊缝的质量、焊接接头的力学性能等技术指标提出了很高的要求。因此设计一般都选用国军标、航天系统的标准作为焊缝探伤和接头质量验收的依据,焊缝大都定为I级要求。

2 尺寸精度难以保证

空空导弹的弹体大都是筒形薄壁细长结构件,设计对其圆度、直线度、跳动量提出了很高的要求。但由于其筒壁薄、刚性差、易变形,而且由多个零件组成,如某舱段壳体,由60

多个零件通过多种焊接方法组合为一个整体,不但焊接变形难以控制,而且各零件之间的相对位置精度也难以保证。

3 材料的焊接性较差

为了减轻重量、增加射程,设计所选用的材料大都是超高强度合金钢、马氏体沉淀硬化不锈钢、高强钛合金、高强铝合金等比强度高的材料。一般来讲,对于钢制零件,材料的强度越高,其焊接性就越差,而高强钛合金、高强铝合金等有色金属由于易出现气孔、裂纹等缺陷更是难以焊接出高质量的焊缝。

空空导弹弹体制造常用的先进焊接方法

根据空空导弹弹体的焊接结构特点和所用材料的分析,焊接时必须选用能量集中、热输入小、所引起的

变形小的焊接方法。

1 真空电子束焊

1.1 焊接原理

真空电子束焊是利用空间定向高速运动的电子束撞击工件表面后,将部分动能转化成热能,使被焊金属熔化、冷凝、结晶而形成焊缝的,其原理示意于图 1。

焊接时,电子枪的阴极通电加热到高温而发射大量电子,在阴极表面形成一团密集的电子云,这些热电子在强电场的作用下被加速到很高的速度,高速运动的电子经过聚束极、阳极的静电场作用和聚焦透镜的电磁场作用而聚集成高能量密度的一束电子射线,它在工件的轰击点处与材料晶格电子、原子相碰撞时被散射和阻止,其动能转变为晶格振动能量即热能,从而熔化工件、形成焊缝。

1.2 技术特点

与其他熔化焊方法相比,电子束焊有如下特点:

(1) 电子束能量密度高、束流直径小,能形成深而窄的穿透性焊缝,不开坡口能一次焊成 300mm 厚的金属,焊缝深宽比可达 50:1,这是其它焊接方法所无法达到的。

(2) 焊接热影响区小,焊接变形小,即使用于精加工零件的最后焊接,也可以保证有足够高的精度。

(3) 现代电子束焊机可通过 CNC 控制电子束的偏移,实现复杂焊缝的自动焊接,并且可焊到一般焊接方法难以接近的部位。

(4) 由于是在真空状态下施焊,所以它尤其适合钛及钛合金等活性材料的焊接。

(5) 由于电子束焊无法进行加丝焊接,所以仅适应于对接焊缝,像需要加丝的角接焊缝,目前尚无法进行电子束焊。搭接焊缝的质量也不理想,一般情况下应尽量避免。

1.3 焊接设备

电子束焊机按真空状态可分为真空型、局部真空型和非真空型 3 类;按电子枪加速电压的高低又可分为高压型(60~150kV)、中压型(40~60kV)和低压型(<40V) 3 种。

真空电子束焊机主要由真空系统、NC 轴控制系统及电子枪系统组成。真空系统为电子枪及焊接室提供所需要的真空环境;NC 轴控制系统提供焊接时所需机械运动轴和控制电子枪电子束的电子轴;电子枪是真空电子束焊机的核心部件,用于发射电子和产生电子束。另外还有供电系统、观察、测量与对中系统、电气控制系统、工作台以及辅助装置等几大部分。

我单位的电子束焊机是法国 TECHMETA S.A. 公司生产的 LARA52 型焊机,配置了 CT-4 型电子束焊枪,为间热式阴极的三极枪,焊机的使用由 CNC 控制单元控制,主要用于空空导弹长筒型薄壁壳体

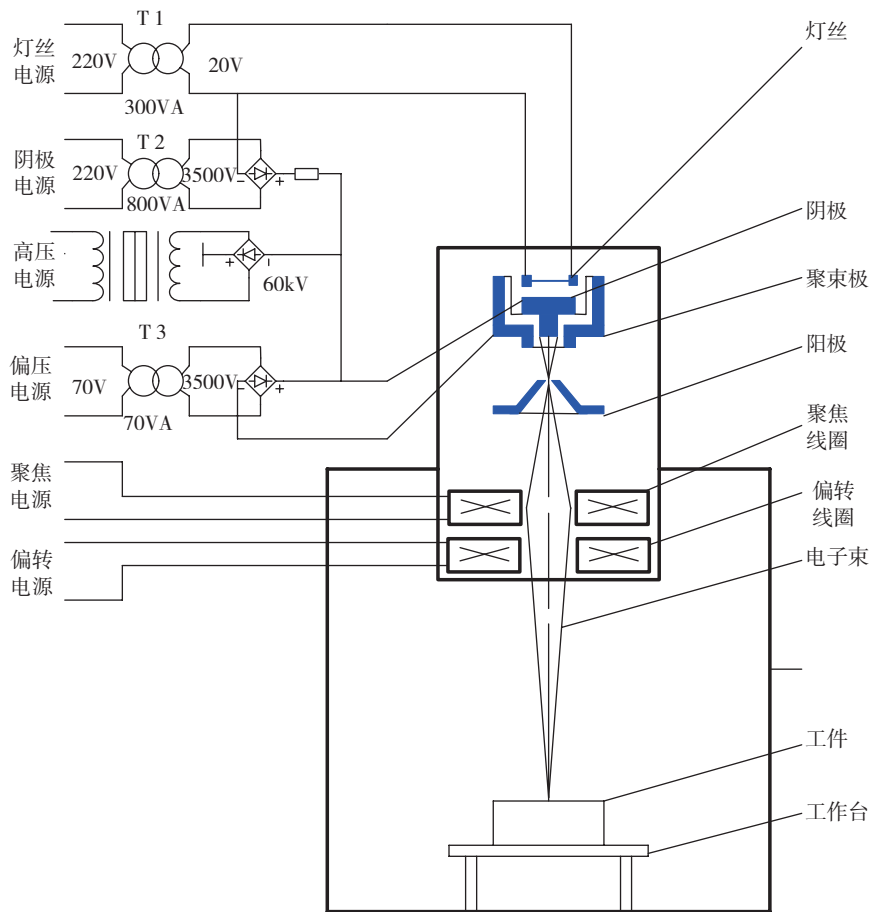


图1 真空电子束焊接原理示意图

零件的焊接生产,适用于结构钢、不锈钢、高强度合金钢、超高强度钢、钛合金、铝合金等材料纵、环缝的焊接。

1.4 焊接工艺

电子束焊的工艺参数主要包括加速电压(kV)、聚焦电流(mA)、电子束流(mA)、焊接速度(mm/s)和工作室的真空度等。由于焊时无法加丝,故焊缝容易出现凹陷、咬边、弧坑等焊接缺陷。焊接工艺流程包括:接头型式选择与接缝制备、焊前清理、工件退磁、工装设计、工件的装夹与装配、校正焊机合轴、焊接参数调试、工件焊接及检验等。

2 真空扩散焊

2.1 焊接原理

扩散焊技术由前苏联的卡扎克夫在1957年发明,它是依靠界面原子间的相互扩散而实现结合的一种精密的连接方法。真空扩散连接是指在一定温度和压力条件下,在真空环境中将待焊工件的表面相互接触,并通过微观塑性变形使之紧密结合,界面处的原子经过一定时间的相互扩散,形成整体接头的一种固态焊接方法。

焊接时,将2个或2个以上的焊件置于真空中紧压在一起,加热至母材熔点以下的某个温度,然后对其施加压力,使其表面的氧化膜破碎,表面微观凸起处发生塑性变形和高温蠕变而达到紧密接触,激活界面原子之间的扩散,在若干微小区域出现界面间的结合。再经过一定时间的保温,这些区域进一步通过原子相互扩散不断扩大。当整个连接界面均形成金属键结合时,则完成了扩散连接过程。实际上,金属表面经过精密加工,其平均偏差也将达到 $0.8 \times 10^{-4} \sim 1.6 \times 10^{-4} \text{cm}$,而实现金属键结合的距离需要 $1.0 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-8} \text{cm}$ 以内,因此在零压力时实际接触点仅为表面积的一百万分之一;施加一般压力也只能达到1%左右,其余表面积的空隙都在原子的引力范围以外,即使接触

点形成金属键,其结合力也极小。除接触面凹凸不平外,还有气体吸附层、氧化层及变形层等,扩散连接时就是采用一定方法克服这些主碍层。

2.2 焊接特点

和其他焊接方法相比,真空扩散焊有如下特点:

(1)同种金属的接头能获得与母材接近或相同的物理、化学、机械性能。

(2)接头无铸造组织、脆性区、裂纹等缺陷,工艺容易控制,批生产质量稳定。

(3)真空扩散连接可与真空热处理结合进行,很多接头能一次焊接成功。

(4)工件变形小,尺寸精密高,能完成大面积的扩散连接。

(5)能焊接一般焊接方法难以焊接的高熔点金属、陶瓷材料和耐热合金。

2.3 焊接工艺

真空扩散焊工艺参数包括加热温度、焊接时对零件施加的压力和在焊接温度下保持的时间及真空度等,其中前三者也是扩散焊接的必要条件。

(1) 温度。

温度是扩散连接最重要的工艺参数。在一定温度范围内,温度越高,则扩散速度越快,结合强度也越高。但达到一定数值后,提高温度由于晶粒长大接头质量反而会下降。受材料物理性能、工件表面状态、设备等因素限制,许多金属及合金扩散连接合适的加热温度一般为 $0.6 \sim 0.8$ 母材熔点。TC4钛合金通常选择 $920 \sim 930^\circ\text{C}$ 。

(2) 压力。

主要作用是使结合面微观凸起部分产生塑性变形,达到紧密接触,同时促进扩散,加速再结晶过程。一般增加压力可提高强度,但过大会变形,同时增加成本,从经济角度考虑应选择较低压力,钛合金通常选择 $1.0 \sim 2.0 \text{MPa}$ 。

(3) 时间。

在焊接温度下保持的时间,必须保证扩散过程全部完成,达到所需的结合强度。时间太短,接头达不到与母材相等程度;高温、高压持续时间太长,质量不能进一步提高,反而会使晶粒长大,形成脆性化合物的接头,应控制保温时间以控制脆性层的生成。保温时间与温度、压力是密切相关的,温度较高或压力较大时,时间可缩短。在一定温度和压力下,焊接时间可在较宽范围内变化。为提高生产率,在保证强度的条件下,时间越短越好。TC4钛合金通常选择 $60 \sim 90 \text{min}$ 。

真空扩散焊的工艺流程包括工件表面制备、装配与装炉、真空扩散焊接及冷却后出炉检验等。其中表面制备和装配质量与其他焊接方法相比,要求尤为严格,因为保证待焊表面有可靠的金属间接触是决定焊接质量的充分条件,必须保证待焊金属表面的粗糙度、平面度要求;必须祛除待焊金属表面的氧化物、污染物,其残留在焊接时应能彻底破坏和分解;必须保证待焊金属界面的空隙弥合。由于设备所限,我们委托外单位用真空扩散焊方法加工的某型号TC4钛合金翼面类空心焊接件已获得初步成功,其焊接质量和尺寸精度都优于电阻焊的同类零件。

3 电阻点焊和滚焊

3.1 焊接原理

电阻点焊及滚焊就是将焊件装配成搭接接头,并压紧在两电极或两滚轮电极之间,利用电阻热熔化母材金属,形成焊点或焊缝的电阻焊方法。电阻点焊一般由以下4个基本程序组成一个循环过程:

(1) 预压:电极下移、施加压力、焊件贴合、过程开始。

(2) 焊接:通电加热、母材熔化、形成熔核、焊接开始。

(3) 维持:继续施压、断电冷却、熔核结晶、焊接结束。

(4) 休止: 去除压力、电极上移、焊机休止、过程结束。

整个循环过程如图 2 所示。

电阻滚焊的原理与点焊的基本相同,为了解决匀速滚焊时焊接后的

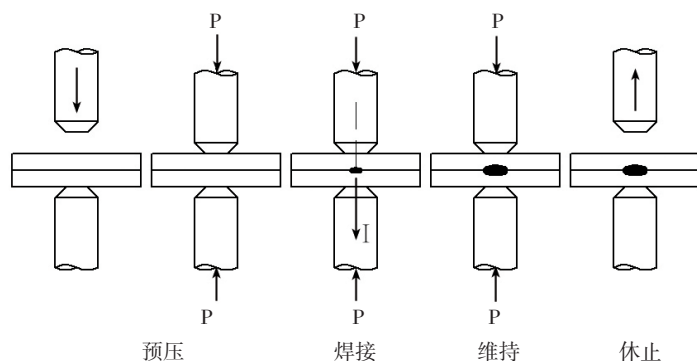


图2 电阻点焊循环过程示意图

压力维持问题,现已开发出了步进式滚焊技术,就是在通电焊接时滚轮停顿,一直将压力维持到金属凝固、形成熔核为止。

3.2 技术特点

电阻点焊及滚焊的最大特点是没有电弧弧光的照射,熔化金属被包裹在母材金属中间,避免了外界空气的污染,因此焊接接头的质量较高;焊接时无须添加任何填充金属,在被焊零件内外表面无任何焊接凸起,能够克服其他先进焊接方法焊后存在加强高的缺点;而且焊接变形极小,能够保证较高的尺寸精度,特别适用于不锈钢、合金钢、时效钢、钛合金等材料制成的薄壁搭接零件的焊接。

3.3 焊接设备

先进直流电阻点焊机多为次级整流式焊机,具备多脉冲焊接功能,可在焊机上进行预热和回火,焊接主脉冲有上坡和下坡的功能;中航工业导弹院从国外引进的SM-AS-2/200/1000型直流纵横两用滚焊机如图3所示,采用三相直流电源、无摩擦薄膜焊接汽缸和16位焊接控制器等先进技术,保证了较高的焊接质量,先进的恒流控制系统可保证焊接质量的高度一致性。焊机具有3段脉冲程序,可提供调质钢等材料所需

的焊后回火脉冲,并且具备匀速滚焊和步进式滚焊的功能。

3.4 焊接工艺

电阻点焊的工艺参数主要包括焊接电流、通电时间、电极压力和电

极的工作面尺寸等;步进式电阻滚焊的焊接参数除和点焊的相同部分外,还包括焊接速度、焊点间距和停顿时间等。焊接工

艺流程主要包括焊前清理、焊接参数调试、零件焊接及检验。

调试电阻点焊工艺参数时,应根据零件的材料和厚度在有关《焊接手册》上查取基本参数。以此为依据,首先确定电极的端面形状和尺寸,初步选定电极压力和焊接脉冲时间,然后调节脉冲电流,以不同的电流焊接几组试样。经检验从对应熔核直径合格试样的参数中优化、筛选出一组参数,再在适当范围内调节电极压力、脉冲时间和电流,反复多次进行验证,直到焊点完全符合质量要求。

对于电阻滚焊参数的调试,当焊件厚度相同时,滚焊的焊接电流比点

焊的要大出10%~20%,这是由于在已经焊完的焊缝处会出现较大的分流;在焊接脉冲时间、焊接休止时间及焊接速度一定时,焊接电流的大小决定着焊缝熔核的宽度和熔核重叠率;而在焊接电流一定时,通常用脉冲时间控制熔核宽度、用休止时间和焊接速度控制熔核的重叠率。

衡量焊点和焊缝质量的主要技术指标有熔核直径、熔核宽度、焊透率、剪切力及有无内、外部缺陷等。图4是我单位焊接的某空空导弹翼面类零件示意图,它属于TC4钛合金蒙皮骨架结构,其中蒙皮通过热成型制作,骨架则用锻件加工,蒙皮与骨架之间采用滚焊连接,蒙皮与骨架之间则采用三层叠加不等壁厚斜面点焊连接。

4 激光焊

4.1 焊接原理

激光焊是利用高能量密度的激光束作为热源进行焊接的一种高效精密的焊接方法。激光焊时,激光照射到金属表面,与金属发生相互作用,金属中的自由电子吸收光子导致电子温度升高,然后通过振动将能量传递给金属离子,金属温度上升,光能变为热能。当激光光斑的功率密度较低时,金属材料表面被加热的温度不会超过其沸点,所吸收的激光能转变为热能后,通过热传导将工件熔



图3 中航工业空空导弹研究院引进的SM-AS-2/200/1000型直流纵横两用滚焊机

化,这就是所谓的“熔化焊”;而当激光光斑的功率密度足够大时,则金属表面在光斑的照射下温度迅速升高,直至沸腾、蒸发,金属蒸汽以一定速度离开熔池表面,其反作用力使液态金属向下凹陷,在激光光斑下产生一个小凹坑。随着

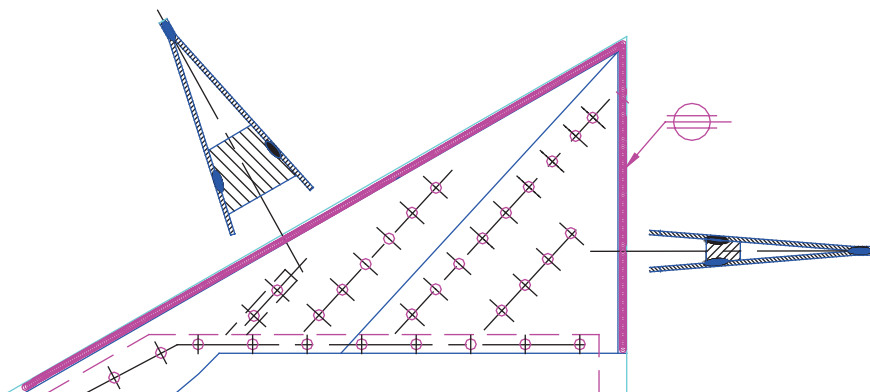


图4 某空空导弹翼面类零件焊接结构示意图

加热过程的进行,激光可直接射入坑底,形成一个细长的“小孔”。当金属蒸汽的反作用力与液态金属的表面张力和重力平衡后,小孔不再继续深入。当光斑功率密度很大时,所产生的小孔将贯穿整个板厚。随着小孔的向前移动,熔化金属绕过小孔流向后方,冷却、凝固而形成焊缝,这就是所谓的“小孔焊”,它与电子束焊的小孔效应类似。

4.2 技术特点

(1) 聚焦后的激光束具有很高的功率密度,加热速度快,可实现深熔焊和高速焊。

(2) 激光束加热范围小、热影响区小、残余应力和焊接变形小。

(3) 激光束能反射、透射,能在



图5 LD804M小型激光焊机

空间远距离传播而衰减减小,可进行远距离或一些难以接近的部位的焊接。

(4) 与电子束焊相比,激光束最大的特点是不需要真空室,不产生X射线。缺点是焊接一些高反射率的金属比较困难。

4.3 焊接设备

激光焊设备一般包括激光器、光束传输与聚焦系统、电源、气源、工作台及控制系统等。图5是一台小型激光焊机的实物照片。

4.4 焊接工艺

脉冲激光焊的工艺参数主要包括脉冲能量、脉冲宽度、功率密度和离焦量等。其中脉冲能量决定加热量的大小,主要影响金属的熔化量。脉冲宽度决定焊接的加热时间,主要影响熔深。连续激光焊的工艺参数主要包括激光功率、焊接速度、光斑直径、焦点距离及保护气体的种类与流量等。

空空导弹弹体常用材料的焊接性

1 铝合金的焊接性

铝合金具有比重小、熔点低、导热系数高、线膨胀系数大、对氧的亲合力强等特点,焊接较为困难。铝很容易生成一层致密而稳定的氧化膜,其熔点高达 2050℃(纯铝的熔点为 695℃),在焊接过程中它会阻碍熔化金属的良好结合,形成未熔合;铝氧化膜的密度比纯铝大 1.4 倍,且易吸附水分,焊接时易形成气孔和夹渣;另外,铝由于其导热率大而在焊接时消耗的热量多,必须采用大功率的电源。

2 钛合金的焊接性

由于钛合金重量轻,导热性能

差,化学活性高,在焊接高温下容易与氢、氧、氮等有害气体结合,使接头变脆,焊接时必须加强保护并使焊接接头焊后为银白色或金黄色;又由于钛合金重量较轻,气泡上浮速度慢,熔池中的气体来不及逸出而形成气孔,这是钛合金焊缝中气孔时常超标而又难以消除的主要原因。

3 马氏体沉淀硬化不锈钢的焊接性

马氏体沉淀硬化不锈钢具有良好的焊接性。由于在固溶处理后所得到的马氏体组织是超低碳的,因而没有脱碳现象和强烈的淬硬倾向,一般焊前无需预热,焊后也不须要缓冷,在拘束度不大的情况下,不会产生焊接冷裂纹;由于淬火时不需要急冷,所以淬火开裂的危险性较小;又由于超低碳马氏体具有良好的塑性,所以能抵抗较大的应力集中,而且在焊接热影响区形成的马氏体组织对冷裂纹的敏感性不大,比具有相同强度水平的低合金高强度钢的热影响区的氢脆敏感性要小。

但是,由于马氏体沉淀硬化不锈钢的合金元素含量高达 20%~30%,属高合金钢,焊接时容易产生偏析并形成逆转奥氏体组织,从而导致焊接热影响区的软化、焊接接头的强度与韧性低于母材等问题。又由于合金元素中含有一定数量的 Cu、Ti、S、P 等元素和杂质,易产生热裂纹。

结束语

随着空空导弹性能的提高,其飞行距离越来越远、速度越来越快、过载越来越大,对弹体焊缝的质量要求也就越来越高,一些粉末冶金材料、复合材料等高强度、高性能的材料将会被陆续应用于空空导弹的弹体制造,其对焊接的质量要求将会更加苛刻,这就需要我们努力去研究、探索更为先进的焊接方法和工艺技术来满足未来先进空空导弹弹体的焊接要求。

(责编 小城)