

# 真空电子束焊接技术及其在空空导弹弹体加工中的应用

Technology of Vacuum Electron Beam Welding and Its Application in Manufacturing of Air-to-Air Missile's Body

中航工业空空导弹研究院 樊兆宝 安绍孔 王英健 李 川



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。

在航空、航天、核能等尖端科技领域中, 焊接技术始终占有极其重要的地位。焊接技术的进步与发展使不同材料如异种金属之间能够实现牢固的接合; 使活性金属、难熔金属

电子束焊接技术以其具有其他焊接方法不可代替的特点而在空空导弹弹体的加工中显示出了巨大的优势。随着空空导弹向着远程、高速、高机动、高过载的方向发展, 一些超轻金属、高强度材料、高精密度零件的焊接将会被陆续提上日程, 各种难以实现的接头形式也将会相继出现, 这为电子束焊接技术的应用和发展提供了广阔的前景。

的焊接性能大为改善; 使可达性极差的复杂焊缝实现自动焊接; 因而焊接技术赢得了“现代工业缝纫师”的美誉。

在众多先进的焊接方法中, 上世纪 50 年代才发展起来的真空电子束焊接是其中的佼佼者。与其他熔化焊方法相比, 真空电子束焊具有能量密度高、穿透能力强、焊缝质量好、热影响狭窄、焊接变形小的优势, 且在焊接过程中, 它不会产生任何污染, 可以焊接到一般焊接方法难以接近的部位等。这些不可替代的优势使其在空空导弹弹体的加工中得到了广泛的应用, 如超高强度钢弹体、固

冲发动机钛合金进气道等众多空空导弹弹体中的关键性零部件都是采用电子束焊方法焊接而成的, 它们不但尺寸精度高, 而且焊接质量稳定。电子束焊的应用还使以前认为无法进行加工的新型设计构想和加工难度很大的复杂零件加工得以实现, 使难以焊接的材料能够较为容易地实现可靠的连接, 对于新一代先进空空导弹弹体的研制开发起到重要的促进作用。

## 真空电子束焊接原理

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,其原理示意图 1。

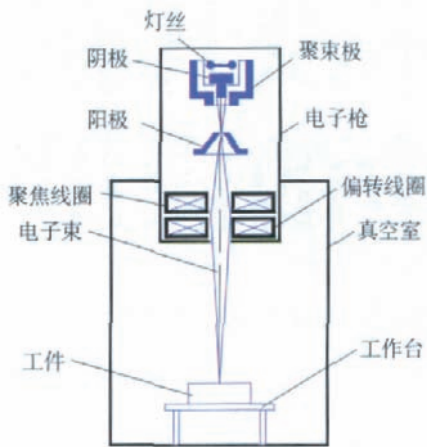


图1 真空电子束焊接原理示意图<sup>[1]</sup>

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线圈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。在低能量密度下,电子束基本上处于工件的表面,焊接过程与一般电弧焊相似;但在高能量密度下,工件材料在电子束的轰击下瞬间熔化并蒸发,强烈的金属蒸气流将部分液态金属吹离电子束作用区,使电子束在熔池底部的固态金属上再聚焦,使其再溶化、再蒸发,再露出新的熔池底部,这样层层剥离,从而形成细而深的被液态金属包围的空腔,即“小孔”效应。当金属蒸汽的反冲压力与液态金属的表面张力和重力达到平衡后,小孔不再继续深入;当电子束功率密度足够大时,所产生的小孔将贯穿整个板厚。熔化金属则被排斥在电子束前进方向的后方,随着电子束的向前移动,熔化金属就冷却、凝固、结晶而形成焊缝。

## 真空电子束焊接工艺

### 1 接头形式选择与接缝制备

#### (1) 接头形式选择。

由于电子束焊能量集中、焊缝狭窄,焊接时无法添加焊丝,搭接形式的接头连接面积较小,承载能力不高,一般情况下应尽量避免;像需要加丝焊接的角接形式的焊缝,焊接的质量也不理想;对接是电子束焊最适用的一种接头形式,对于以强度作为主要技术指标的焊接接头,更是如此。电子束焊时,对接的主要接头形式有平头对接、双凸边对接、加强对接、锁底对接、止口对接、不等厚度对接等,焊接时可根据被焊工件的结构特点和技术要求进行选择,例如圆周对接焊时,为了提高精度、避免错位,可以采用锁底对接或止口对接的型式。

#### (2) 接缝制备。

接头的接缝端面应进行仔细修合,使其平整、光滑、无毛刺,并保持锐边。对于锁底对接或止口对接型式的圆周接缝,应作到贴合紧密、扣合牢固。

### 2 焊前清理

电子束焊是在真空状态下焊接的,一般不会产生空气对熔池区域的侵蚀和污染问题,但对于电子束区域内部所出现的氢、氧、氮等有害气体,电子束焊却毫无祛除的能力。但如果工件清洗不净,残存的氧化皮、油脂和水分就会进入到熔池及电子束区域中去,它们在高温下迅速分解为氢气和氧气,这不但会烧损有益的合金元素,而且会出现气孔、夹渣和氢脆,并污染工作室内腔。因此,焊前认真清理工件,严防氢、氧等有害气体的进入,对于焊缝质量的保证至关重要;焊前清理分为化学清理和机械清理两种,清理后到焊接有时限要求。为防止清理后的工件被重新污染,周转和施焊时,操作者均应戴洁净的手套,同时为防止焊接材料表面

附着较多的水分,还应控制焊接工作间的湿度,对于钛、铝等易出现气孔的材料,应尽量避免在潮湿的季节焊接。

### 3 工件退磁

由于被焊工件的剩磁会使电子束发生偏移,造成未熔合或焊偏缺陷,所以所有被焊工件和焊接夹具的磁通密度都不许超过  $1 \times 10^{-4} \text{T}$ ,否则必须进行退磁处理。

### 4 工装设计

为控制焊接变形、保证焊件的尺寸精度和各零件之间的相对位置精度要求,必要时须设计焊接夹具。夹具的设计原则应有利于工件的装配定位,防止焊接变形,方便焊接和提高劳动效率。

### 5 工件的装夹与装配

焊接前,工件中所有的零件都应根据结构尺寸和形状位置的要求,在焊接夹具上按一定顺序组合、装配成一个整体。装配时应准确到位,保证各零件之间的相对位置精度、保证接缝处间隙和错位的精度要求,一般情况下,接缝间隙应控制在  $0.15 \text{ mm}$  之内,错位量不应超过  $0.20 \text{ mm}$ 。

### 6 校正焊机合轴

调试、校正焊机合轴就是使电子束的中心轴与聚焦透镜的中心轴相重合。不然,电子束就有可能发散和偏移,一般每批产品焊前应校正一次。

### 7 焊接工艺参数及其调试

#### (1) 焊接工艺参数。

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。它们的改变,将对电子束焊的焊接深度、内部质量和焊缝的横截面几何形状产生不同程度的影响。

· 加速电压(kV): 在其他条件不变时,加速电压越高,焊接熔深就越大,这是因为加速电压升高时,电子束的功率和功率密度也随之增大,

穿透能力增强。实践证明,电子束穿透金属的深度与加速电压的高次方成正比,同时也与金属的密度成反比。

· 电子束流(mA): 在其他条件一定时,增加电子束电流,焊缝的熔深和熔宽都会变大,这是因为电子束电流增大时,电子束的功率虽然增加,但其聚焦性能变差,电子束的功率密度增加较缓,故表现为焊缝的熔深和熔宽同时增加。

· 聚焦电流(mA): 聚焦电流的大小决定了电子束的焦点在被焊工件厚度方向上的位置。当电子束的焦点处于工件表面上方时,称为散焦焊接;当焦点处于工件上表面时,称为表面聚焦;焦点在工件厚度范围之内时称为中聚焦;焦点处于工件下表面及以下时成为下聚焦。实践证明,焊接熔深以电子束的中聚焦为最大。一般情况下,当焊件厚度  $\delta \leq 2\text{mm}$  时,采用散焦焊接;当焊件厚度  $2\text{mm} < \delta \leq 10\text{mm}$  时,采用表面聚焦焊接;当焊件厚度  $10\text{mm} < \delta \leq 20\text{mm}$  时,采用中聚焦焊接;当焊件厚度  $\delta > 20\text{mm}$  时,则需采用下聚焦焊接。

· 焊接速度(mm/s): 一般情况下,焊接速度增加,焊接线能量减小,反映在焊缝横截面的几何形状上是熔宽和熔深都将减小。

· 工作室的真空度: 当工作室的真空度降低时,不但会使焊缝的污染程度增加,还会使电子束发生散射,电子束的功率和功率密度降低,穿透能力下降,使焊缝的熔深减小,深宽比降低。

#### (2) 焊接工艺参数的调试。

电子束焊缝的内部质量、焊接深度及横截面几何形状,不仅取决于工艺参数,而且还与电子束焊机的功率大小、性能参数、电子枪和被焊工件之间的相对位置,被焊工件的技术特点有关。因此,在调试具体某一个工件的工艺参数时,要充分了解和熟悉

各参数的作用、它们之间的相互影响和匹配关系,结合被焊工件的结构特点、技术要求、材料种类与性能、几何形状、尺寸精度、重要程度等因素,经过反复多次的焊接试验,最终筛选出一组最佳的焊接工艺规范参数。

应当注意: 所调试的焊接参数只有在试件焊缝的外观检验、X-光探伤、接头强度全部符合设计要求,并通过了首三件的焊接验证之后,才能用于批量生产。

## 8 工件焊接

### (1) 束流对中。

目的是验证电子束斑点在被焊工件上移动时始终位于接缝线上,其偏差不应超过  $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 。

### (2) 定位焊。

以圆周接缝为例,一般情况下,当直径  $\phi \leq 500\text{mm}$  时,定位 8 点;当直径  $\phi > 500\text{mm}$  时,定位 16 点;每一点的长度为: 起弧  $2.5^\circ$ 、焊接  $2^\circ$ 、收弧  $2.5^\circ$ 。束流的大小可根据筒体的厚度和装配间隙灵活掌握,一般为焊接束流的  $25\% \sim 35\%$ ,间隙大时采用散焦,间隙小或无间隙时可采用表面聚焦。

### (3) 封焊。

为了保证焊接质量,避免烧穿等缺陷的产生,必须进行封焊。封焊时电子束流的大小视接缝的间隙而定,以能够将接缝封住为准,一般为焊接

束流的  $30\%$  左右,并根据间隙的大小决定是否采用散焦。

### (4) 焊接。

焊接时电子束流的大小以焊缝正面不出现凹陷、背面保证焊透、外观成型良好为依据进行。

### (5) 修饰焊。

当焊缝表面成型不良或出现咬边、凹陷等缺陷时可进行修饰焊,修饰焊时的束流一般采用散焦,其大小与封焊时基本相同。

## 真空电子束焊接技术在空导弹弹体加工中的应用

### 1 弹翼基座与弹体外筒体的焊接

弹翼基座是固定翼面的零件,在导弹飞行过程中要承载全弹的重量,而且在导弹追踪目标作机动飞行时,还要承受数十倍于弹体重量的过载,是空空导弹中重要的承力件。它与弹体外筒体之间靠焊接连为一体,两个零件均由 0018Ni 高强度马氏体时效钢制作。在采用手工钨极氩弧焊接时,不但焊接变形大,圆度不易达到要求,而且还会出现图 2 所示的弹翼基座与外筒体的接触面仅靠周边焊在一起,而中间区域仍为分离的两体结构的现象。

采用电子束焊方法后则较好的解决了这个问题,不但尺寸精度较高,而且实现了弹翼基座与弹体外筒

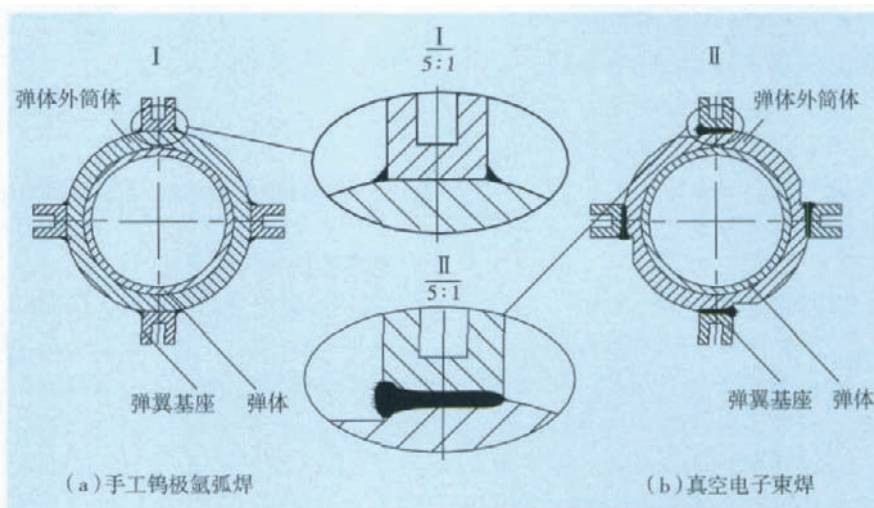


图2 弹翼基座与弹体外筒体手工钨极氩弧焊和真空电子束焊对比示意图

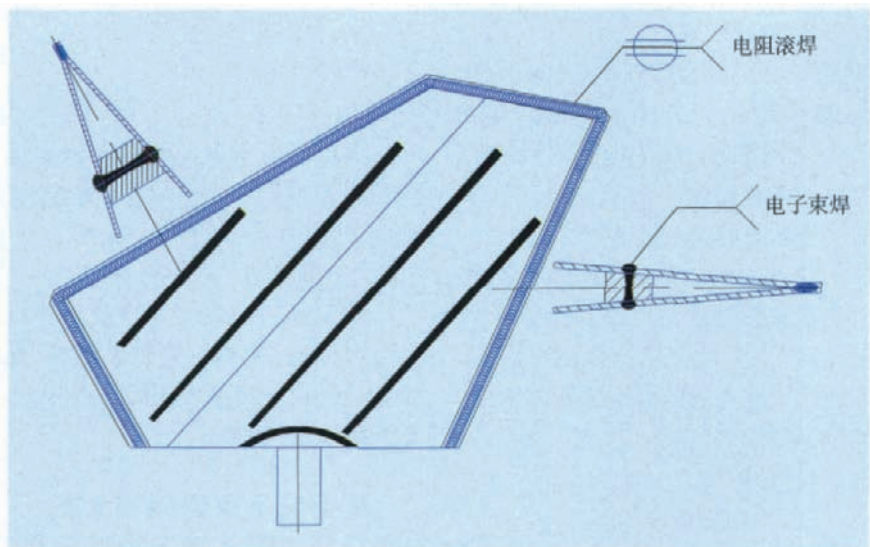


图3 舵面蒙皮与骨架电子束焊接试验示意图

体接触面全连接的设想,和整体加工基本相同,大大提高了弹翼基座对空空导弹的承载能力。

## 2 舵面蒙皮与骨架的焊接

现代空空导弹的舵面一般都采用较为先进的蒙皮骨架结构,材料为比强度较高的TC4钛合金。其中蒙皮与蒙皮之间采用电阻滚焊连接,蒙皮与骨架之间以前多采用电阻点焊,为了满足轻量化的要求,骨架宽度一般都作的比较狭窄,点焊时经常发生飞溅,造成焊点疏松和压痕过深等缺陷,如果采用电子束焊,则会克服这种现象。再者,由于电子束焊是在真空状态下焊接,避免了空气对焊缝和热影响区的侵蚀和污染,对钛合金有着良好的保护作用,现在我们正在开展这方面的试验工作,如图3所示。

## 3 弹体圆筒与端环的焊接

空空导弹中弹体圆筒与端环之间通过圆周焊缝连接为一个整体。为了便于装配,保证尺寸精度,采用了锁底对接的结构形式。在采用自动钨极氩弧焊焊接时,熔化金属都严重地偏向弹体圆筒一方,如图4所

示,在端环的锁底根部出现未焊透缺陷。

为了消除这种缺陷而增大电流,但甚至将弹体圆筒烧穿时,端环的锁底根部仍保持完好的固态形式,根本就没有熔化,未焊透缺陷持续存在。同时,过分增大电流还会在弹体圆筒

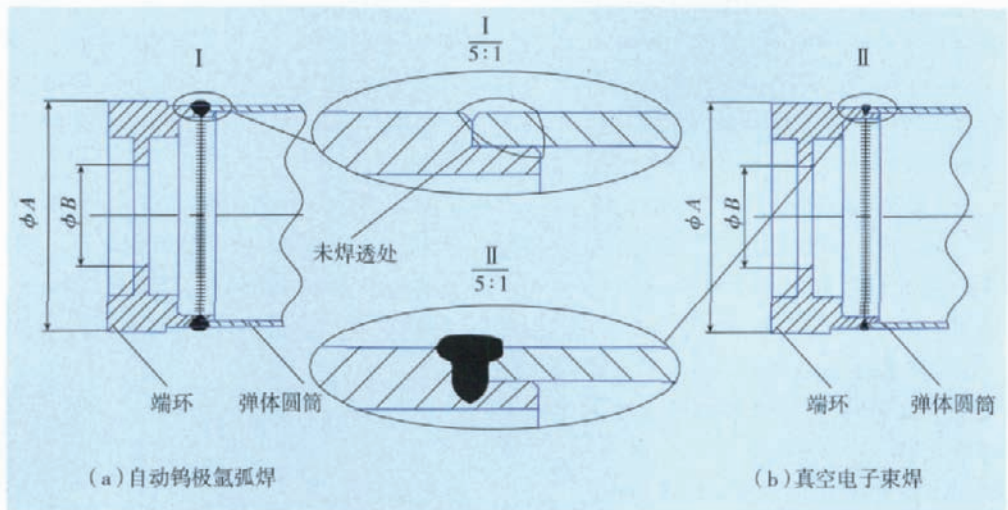


图4 弹体圆筒与端环自动钨极氩弧焊与真空电子束焊对比示意图

一侧的热影响区内造成凹陷,通过分析,我们认为这是端环和弹体圆筒的热容不平衡,两者相差过于悬殊造成的。端环筒壁厚,热容大,而弹体圆筒筒壁薄,热容小,给于相同的热量,弹体圆筒的温度迅速上升熔化,而端环却升温慢、温度低,锁底处未达到熔化温度而造成未焊透缺陷。采用

真空电子束焊则不会出现这种现象,真空电子束具有能量密度高、热量输入迅速的特点,焊接时能够形成深而窄的穿透焊缝,故接缝两侧的热容不平衡和锁底结构对其焊接质量不会构成影响,不会产生未焊透缺陷,这已经得到了试验的验证。

## 结束语

电子束焊接技术以其具有其他焊接方法不可代替的特点而在空空导弹弹体的加工中显示出了巨大的优势。随着空空导弹向着远程、高速、高机动、高过载的方向发展,一些超轻金属、高强度材料、高精密度零件的焊接将会被陆续提上日程,各种难以实现的接头形式也将会相继出现,这为电子束焊接技术的应用和发展提供了广阔的前景。相信随着空空导弹弹体制造对焊接技术需求的拉动和牵引,电子束焊接技术将会得到进一步的发展和完善,反过来满足新

一代先进空空导弹在研制过程中对焊接技术日益提高的需求。

## 参考文献

- [1] 沈世瑶. 焊接方法与设备·第三分册·电渣焊与特种焊. 北京: 机械工业出版社, 1982.

(责编 泰山)