

固体火箭冲压发动机壳体 焊接技术

Welding Technology of Solid Rocket Scramjet Engine Shell

中国空空导弹研究院 樊兆宝 王英健 曹任刚 杜楠 王攀锋



樊兆宝

空空导弹研究院研究员, 国际焊接工程师, 主要从事焊接工艺技术工作。

为了对付性能越来越先进的空中威胁, 世界各主要军事强国目前都在大力发展远程、超远程和超音速飞行的空空导弹, 而这类导弹的共同特点就是速度快、重量轻、推力大、射程远。传统的固体火箭发动机无法给此类导弹提供更多的飞行动力, 因此, 冲压发动机的设计就应运而生。

采用助推器和冲压发动机整合

冲压发动机壳体各部件的加工和装配精度、工作中发动机突出的非对称性结构的气动力载荷和整体式燃烧室较高的工作压强等, 都对冲压发动机壳体的焊缝质量、焊接接头的力学性能、壳体的尺寸精度和所用材料的性能等技术指标提出了更高的要求。

设计的固体火箭冲压发动机与相同质量的传统固体火箭发动机相比, 理论上它可以为导弹飞行提供两倍多的动力, 从而增加了导弹的射程, 扩大了其攻击范围, 这对于夺取空战的制空权至关重要。但由于固体火箭冲压发动机特殊的吸气式工作方式, 较之传统固体火箭发动机, 其结构更为复杂, 而弹体表面和内部功能性特征的激增, 给冲压发动机壳体的加工带来了困难。在这种情况下, 焊接连接方式就成为冲压发动机壳体必需的一种加工方法。然而, 冲压发动机壳体各部件的加工和装配精度、工作中发动机突出的非对称性结构的气动力载荷和整体式燃烧室较高的工作压强等, 都对冲压发动机壳体的焊缝质量、焊接接头的力学性能、壳体的尺寸精度和所用材料的性能等技术指标提出了更高的要求。

固体火箭冲压发动机壳体的结构特点

空空导弹固体火箭冲压发动机壳体一般由燃气发生器壳体、助推补燃室壳体、进气道等部分组成。

(1) 燃气发生器壳体。

燃气发生器壳体一般由顶盖、壳体圆筒和连接环通过两条圆周焊缝连接为一个整体, 如图 1 所示。

其中, 顶盖和连接环用于密封及与其他舱段的连接, 并可增加壳体的刚性, 它们一般由棒材通过车削加工而成, 焊前留有加工余量。壳体圆筒根据需要可以用管材通过强力旋压成型, 也可以用管材通过车削加工而成, 焊前已加工到最终尺寸。圆周焊缝根据具体要求可以采用自动氩弧焊、真空电子束焊、激光焊等方法进行焊接。

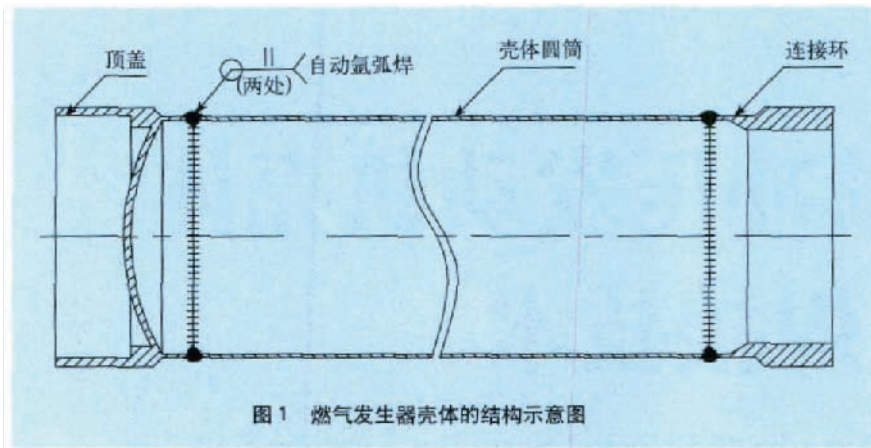


图1 燃气发生器壳体的结构示意图

(2) 助推补燃室壳体。

助推补燃室壳体的结构特点与燃气发生器壳体的基本相似，圆周焊缝的焊接方法也相同。助推补燃室壳体的结构如图2所示。由于其形状特殊、所焊零件较多，因此焊接变形也大。它不但比燃气发生器壳体多了一条圆周焊缝，而且还须在筒体上开两个方孔或斜向椭圆孔，以便和两个进气道安装座焊在一起，用于连接两个进气道，三个圆筒形零件在发动机壳体的中段立体斜交，因此多了两条进气道安装座焊缝。由于是角接连接，一般采用手工焊方法进行焊接。

由图1和图2可以看出：燃气发生器壳体和助推补燃室壳体一般都是一个筒型焊接结构件，其筒壁厚薄、刚性差、易变形、尺寸精度难以保证，焊接难度较大。

(3) 进气道。

进气道的型面结构比较复杂，采用整体机械加工的方法几乎无法实现，所以目前进气道一般多采用分段进行精密铸造，然后用多条焊缝焊接而成，由于焊后机械加工困难，所以一般都采用能量集中、焊接变形较小、热影响区狭窄的电子束焊或激光焊的方法进行焊接。进气道的结构如图3所示。

固体火箭冲压发动机壳体对焊接的技术要求

(1) 焊接质量。焊缝的外观与内部质量一般按行业标准I级进行验收，并100%的进行X光探伤。

(2) 接头强度。焊接接头的强度要求必须达到基体强度的90%~95%。

(3) 尺寸精度。焊后各焊接件之间的相互位置精度及焊接组合件的圆度、直线度、同轴度等尺寸精度

的要求较高，焊缝两侧基体的错位量、焊缝背面余高等要求一般都高于行业标准I级所规定的技术指标。

(4) 液压检验和爆破试验。由于冲压发动机壳体工作条件相当苛刻，焊接之后还要进行液压检验和爆破试验，在达到设计指标之前，焊缝不许破坏。

固体火箭冲压发动机壳体材料的焊接性

为了减轻重量、增加射程，固体火箭冲压发动机除充分利用大气中的氧气来提高其装药的燃烧效率外，另一个途径就是尽可能地减轻发动机壳体的重量。因此，为了最大限度地提高推重比，比强度这一材料性能指标就成了设计选材时最重要的依据。一般情况下，燃气发生器壳体和助推补燃室壳体大都选用低合金高强度钢、马氏体沉淀硬化不锈钢等比强度较高的材料，对于进气道，则多采用钛合金等。

1 马氏体沉淀硬化不锈钢的焊接性

马氏体沉淀硬化不锈钢经固溶加时效热处理后得到时效马氏体组织，其强度可达1700~1800MPa，具有高强度和高韧性相搭配的优异性能。

固溶后生成的超低碳马氏体，韧性较好，这就降低了材料在快速冷却时所产生的硬度和应力，避免了焊缝和热影响区内裂纹的形成，因此焊前无需预热，焊后也不要缓冷。

但该钢焊接时在其热影响区中会出现一个软化区域，其温度范围在750℃~600℃左右，组织结构为马氏体和逆转奥氏体，即在马氏体基体上分布有弥散的奥氏体组织，而且奥氏体的数量会随着焊接线能量的增大而增加，由于这些奥氏体组织不能经过随后的时效而硬化，故表现为强度低、硬度低，因此采用熔焊方法焊接时效不锈钢时必须严格限制线能量的输入。

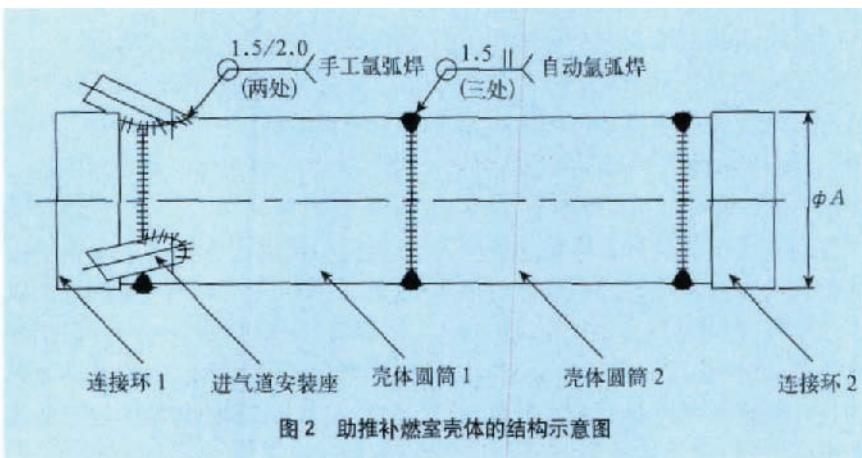


图2 助推补燃室壳体的结构示意图

2 钛合金的焊接性

由于钛合金的重量轻,导热性能差,化学活性高,焊接时可能会出现下列问题:

(1) 氩弧焊时的保护问题。

钛及钛合金的化学性质在高温下极为活泼,试验表明:钛从 250℃ 开始吸收氢,从 400℃ 开始吸收氧,从 600℃ 开始吸收氮,而空气的主要成分就是氧和氮,故焊接时钛的氧化过程最容易进行。如果缺乏保护

固体火箭冲压发动机壳体常用的焊接方法

1 钨极氩弧焊

钨极氩弧焊是以氩气作为保护气体,利用钨电极与工件之间的电弧热熔化母材和填充焊丝的一种焊接方法。焊接时氩气从焊枪的喷嘴中连续喷出,在电弧周围形成气体保护层来隔绝空气,以防止其对钨极、熔池及近缝区的有害影响,从而获得优

能力,因为它不像电焊条药皮那样含有脱氧除氢剂。如果清洗不净,残存的氧化皮、油脂和水分就会进入到熔池及电弧区域中去,它们在电弧的高温作用下,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。因此,焊前认真清理焊件,严防氢、氧等有害气体进入焊接区域,对保证焊缝质量至关重要。

2 真空电子束焊

真空电子束焊是近几十年来才发展起来的一种新的高能束流熔化焊接技术,其原理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,冷却结晶而形成焊缝。与其他熔化焊方法相比,电子束焊有如下优点:

(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,焊缝深宽比可达 50 : 1,不开坡口可一次焊成 300mm 厚的金属,这都是其他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,也可以保证足够高的尺寸精度;

(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,所以这种焊接方法尤其适合钛及钛合金等活性材料的焊接,我们已对进气道焊缝进行电子束焊的试焊工作,并已取得较好的焊接效果。

主要技术难点

1 焊接变形

由固体火箭冲压发动机壳体的结构特点可知:其主体是壳体圆筒,通过强力旋压、碾展而成,冷作硬化现象十分严重,存在较大的内应力。由于壳体圆筒筒壁薄、刚性差、易发生椭圆变形,而顶盖和连接环壁厚较

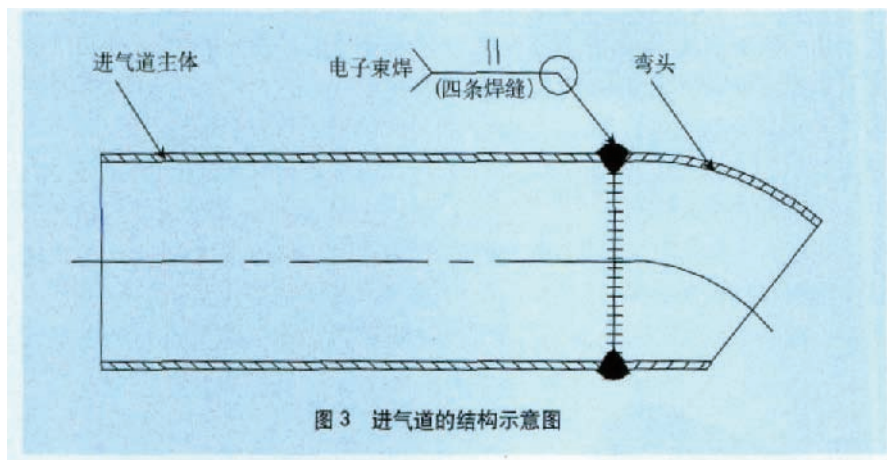


图3 进气道的结构示意图

或保护效果不好,氮、氢、氧等有害元素就会被吸入熔池或近缝区,使其性能变坏,氮、氢、氧的增加不但会引起焊缝气孔的增加,而且使焊缝塑性下降、变脆,故焊接时超过 250℃ 的区域都必需加以保护,从外观上应保证焊后接头为银白色或淡黄色。

(2) 焊缝气孔。

钛合金重量较轻,比重为 4.5g/cm³,仅为钢材的 57%,故焊接时熔池中相同体积气泡所受的浮力仅为钢熔池的一半,气泡上浮速度慢,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) 焊接接头的晶粒粗大,其塑性低于母材。

由于钛合金导热性能差,故高温停留时间长,约为钢的 3~4 倍,冷却速度慢,焊缝和近缝区被加热到远高于相变温度,结果晶粒粗大,塑性较低。

质的焊缝。钨极氩弧焊操作方式又可分为手工氩弧焊和自动氩弧焊。手工氩弧焊时,焊枪的运动和添加焊丝完全靠手工操作,灵活多变,一般用于吊挂、进气道安装座、加强筋等无规律角接焊缝的焊接。而自动氩弧焊则多用于燃气发生器壳体和助推补燃室壳体的圆周焊缝等有规律对接焊缝的焊接。

钨极氩弧焊的优点是焊接时氩气能有效地隔绝周围的空气,而它本身又不和金属反应,能够避免合金元素的烧损;因其电弧功率小,脉冲焊时适用于薄壁及超薄壁零件的焊接;由于其热源和填充焊丝可分别控制,热量容易调节,是实现单面焊双面成形的理想方法。缺点是生产效率较低;而且焊前需要严格的清理。氩气是一种惰性气体,其作用是把空气排开,保护电弧和熔池区域免受空气的侵蚀,但对于电弧区域内部所出现的氢、氧、氮等有害元素,却毫无去除的

厚,刚性好,又是机加件,圆度尺寸精度较好,因此圆周焊缝两侧的错位量时有超差。而且,在薄壁的壳体圆筒筒身上不但要焊接两个进气道安装座,还要焊接吊挂、加强筋等辅助零件,因此椭圆变形难以控制,尺寸精度很难达到设计要求。

2 焊缝质量问题

由于冲压发动机壳体焊缝的工作条件苛刻、工作环境恶劣,因此设计将焊缝定为行业标准 I 级,并 100% 进行 X 光探伤。一般情况下,时效不锈钢应该在固溶状态下焊接,但由于壳体圆筒是旋压件,强度高,塑性低,应力大,焊接时有可能产生裂纹。又由于要在薄壁的壳体圆筒筒身上焊接进气道安装座、吊挂、加强筋等零件的角接焊缝,电流小则会产生根部未焊透缺陷,电流大则壳体圆筒就有被焊漏和烧穿而导致报废的危险。再者,焊缝是否存在根部未焊透焊后无法直接观测到,需进行截面剖切和金相检验才能知道结果,这需要进行反复多次的练习和试验验证,才能得出各自的焊接工艺参数,掌握其操作要领。进气道一般由钛合金分段铸造而成,由于钛合金的特性,其焊缝气孔特别是熔合线附近的显微气孔一直没有得到很好的解决。再者,进气道接缝处的母材厚度不同,甚至在同一条焊缝上,也有好几种厚度,因此需要调试多套焊接参数。在同条焊缝中不同厚度的结合部位,焊接缺陷难以避免。

3 各零件的相对位置精度问题

固体火箭冲压发动机壳体由多个零件通过焊接组合而成,特别是焊在筒身上的安装座、加强筋、吊挂、固定片等,相对位置精度要求极为严格,周向角度公差、轴向尺寸公差等要求都是工艺上需要解决的问题。

采取的工艺措施

(1) 制定合理的工艺流程,选择合适的焊接方法。

应根据不同的冲压发动机壳体设计的特点,进行具体的技术分析,根据其结构特点、技术要求、材料特性,合理选择有关零件的焊前加工余量和各零件的焊接次序,合理配置机加、焊接、热处理等的先后顺序,结合所选择的焊接方法与设备,制定出最佳的加工方案和焊接工艺流程。

(2) 打磨与清洗。

为了防止气孔和夹渣,在焊接之前,要严格打磨清除各焊接件上的油污、锈蚀及氧化皮等。要把零件内外表面用丙酮等清洗干净,并清洗焊接夹具。电子束焊时还要去除各被焊零件和夹具上的剩磁,以防其干扰电子束。

(3) 调试焊接参数。

对于自动氩弧焊,焊接参数的调试主要以提高保护效果,减少气孔和夹渣、保证单面焊双面成形为目的。

子束焊时一般无法进行加丝焊接,故避免焊缝凹陷、咬边、弧坑及气孔是调试参数的主要目的。

由于手工氩弧焊多用于冲压发动机壳体辅助零件无规律角接焊缝的焊接,故参数调试的主要目的是保证角焊缝的根部焊透、防止壳体圆筒的焊漏和烧穿等。

必须指出:所调试的焊接参数只有在试件焊缝的外观检验、X 光探伤、接头强度等技术指标全部符合设计要求,并通过了适当数量的冲压发动机壳体的焊接验证后,才能用于批量生产。

(4) 设计焊接夹具。

为了控制焊接错位,防止筒体的椭圆变形,保证各零件之间的相对位置精度,必须有针对性地设计各焊接夹具。图 4 是焊接某试验用小型冲压发动机壳体的进气道与补燃室壳

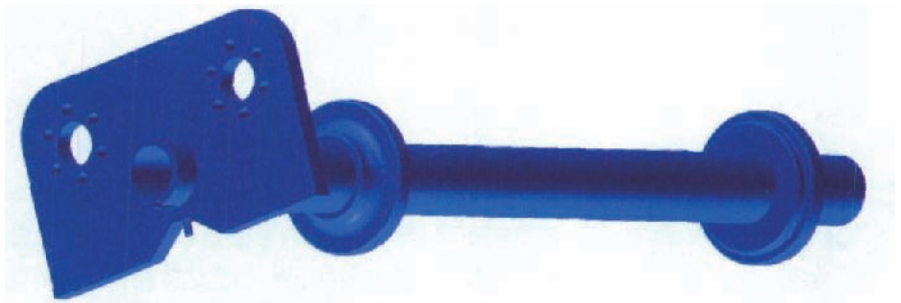


图 4 补燃室壳体和进气道焊缝的焊接夹具主要零件示意图

体之间焊缝时所采用的焊接夹具示意图。

焊接参数主要包括焊接电流、电弧电压、焊接速度、钨极直径、焊丝直径与送丝速度、氩气流量等。

其中焊接电流与焊接速度是两个比较重要的工艺参数,焊缝的外观成形、内部质量及背面成形需要它们之间的良好匹配。

有时为了降低线能量,减小热影响区宽度和焊接变形,对于薄壁零件,常常采用脉冲焊,其参数有脉幅、脉宽和频率等。

电子束焊的焊接参数主要包括加速电压、聚焦电流、电子束流、焊接速度和工作室的真空度等。由于电

结束语

和传统的固体火箭发动机相比,固体火箭冲压发动机因其能够提供更为强大的推力而有着广阔的发展前景,但该冲压发动机壳体结构的复杂性、工作条件的特殊性、所用材料较差的焊接性以及对接质量和尺寸精度的高要求,都对焊接技术提出了新的课题,需要我们不断进行研究和探索。

(责编 晓霏)