

空空导弹弹体典型焊接缺陷及其控制技术

Typical Weld Defect on Air-to-Air Missile Body and Its Control Technology

中国空空导弹研究院 樊兆宝 安绍孔 王英健 桑胜盈
中国人民解放军驻中国空空导弹研究院军事代表室 杨士义

[摘要] 介绍了空空导弹弹体的结构特点、焊接技术要求、所用材料及常用的焊接方法,分析了圆周焊缝典型的焊接缺陷、危害及产生原因等,并就如何防止和消除焊接缺陷进行了深入的探讨,同时介绍了几种控制焊接缺陷的工艺方法。

关键词: 空空导弹弹体 焊接缺陷 工艺措施

[ABSTRACT] The structure type, the requirement of welding process, the material and the welding method are discussed for air-to-air missile. The welding defects and those harm, the reason of defects in the welding structure for circular weld are studied, the technologies of preventing and removing the welding defects are discussed as well. At the same time, some welding technologies to prevent welding defects are discussed.

Keywords: Air-to-air missile body Weld defect Technical measure

空空导弹是以在空中高速运动的飞行器作为发射平台,用于攻击空中高速运动目标的一种自动寻的武器。空空导弹的弹体一般为薄壁焊接组合件,在导弹随机挂飞及在发射后的自主飞行过程中,其弹体不但要承受较强的疲劳应力、很大的纵向和横向过载,而且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,而焊接缺陷的存在势必将会严重威胁导弹的安全性和可靠性,必须尽量避免和消除。

1 空空导弹弹体的结构特点、焊缝形式及常用材料

空空导弹的弹体一般由承担不同任务的各功能舱段壳体通过机械连接而成,如图1所示。而各功能舱段壳体的典型结构如图2所示。

可以看出,空空导弹各功能舱段壳体一般由前连接环、壳体圆筒和后连接环通过2条圆周焊缝连接为一个整体,其中前、后连接环用于和其他舱段的连接,并可增加弹体的刚性,它们一般由棒材或锻环通过车削加工而

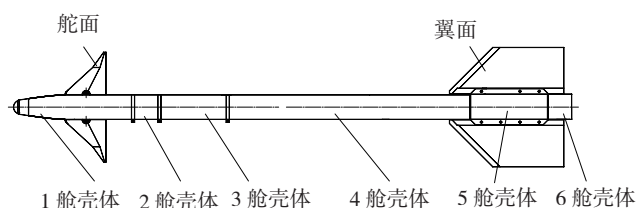


图1 空空导弹弹体结构示意图

Fig.1 Structure diagram of air-to-air missile body

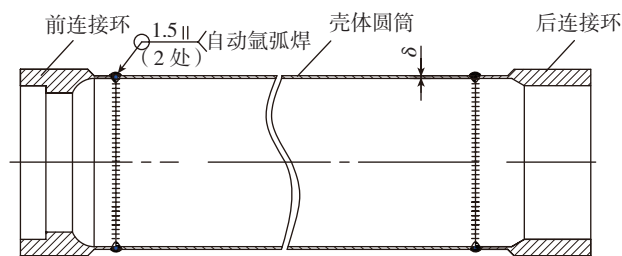


图2 空空导弹各功能舱段壳体的典型结构示意图

Fig.2 Typical structure diagram of each function cabin of air-to-air missile

成,焊前留有加工余量。壳体圆筒则根据需要可以用管材通过强力旋压成形,也可以用板材通过展开料加工、热压成形、母线对接焊缝焊接、热校型等工序加工而成。

空空导弹弹体的焊接接头形式主要是薄壁筒体对接或搭接圆周焊缝。根据具体要求常采用钨极氩弧焊、真空电子束焊、激光焊、连续点焊或电阻滚焊中的任何一种焊接方法进行焊接。为了减轻重量,提高承载能力,设计根据各功能舱段的特点,一般都选择高强度结构钢,超高强度马氏体沉淀硬化时效钢及钛合金等比强度较高的材料。

2 空空导弹弹体典型的焊接缺陷、危害、产生原因及预防措施

焊接接头的不连续性、不完整性被称为焊接缺陷。在产品的焊接过程中,由于设备、工艺、材料、环境及工人的操作水平等各种因素的影响,往往会在焊接接头中产生各种缺陷。空空导弹弹体圆周焊缝中典型的焊接

缺陷有气孔、未焊透、裂纹、错边、咬边、未焊满、夹渣及焊缝成型不良等。这些缺陷的存在,往往是造成焊接接头失效破坏的根源。

2.1 气孔

2.1.1 气孔的概念及危害

焊接时,熔池中的气泡在凝固时未能逸出而残留下来所形成的孔穴称为气孔。气孔会降低焊缝的致密性,减少焊缝的有效工作面积,降低强度,使焊缝塑性、韧性下降。有资料认为,当气孔引起的承载面积减小10%时,疲劳强度的下降可达50%。带尖角的气孔还会引起应力集中成为裂纹。

2.1.2 焊缝气孔的产生原因

在空空导弹弹体各功能舱段壳体的电子束焊、自动钨极氩弧焊的焊接加工中,高强度结构钢、超高强度马氏体沉淀硬化时效钢的焊缝一般不会出现超标气孔,但钛合金舱段的焊缝却容易出现气孔,特别是密集性显微气孔时有超标。这既有基体材料方面的原因,也有焊接方法的因素。

(1) 基体材料。

钛及钛合金的化学性质在高温下极为活泼,试验表明:钛在250℃开始吸收氢,在400℃开始吸收氧,在600℃开始吸收氮。高温时,氢在液体金属中的溶解度较大,大量的氢溶解在焊缝熔池中,而焊缝熔池在热源离开后快速冷却,氢的溶解度也急速下降,因此析出氢气。而钛合金重量较轻,密度为4.5g/cm³,仅为钢材的57%,故焊接时对熔池中相同体积气泡的浮力仅为钢熔池的一半,所析出的气泡上浮速度慢,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。

(2) 焊接方法。

氩弧焊所用的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、氮等有害气体,却毫无去除的能力,因为它不象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而产生气孔。真空电子束焊的情况和氩弧焊类似,在焊接时熔池区域因处于真空状态而不会受到空气的污染和侵蚀,但对于熔池区域和基体材料所释放的氢、氧等气体却无法排除。

2.1.3 消除气孔缺陷的工艺措施

由以上分析可知,杜绝氢、氧等有害气体的来源是防止电子束焊、氩弧焊钛合金舱段焊缝气孔的最有效措施,为此,我们采用了如下工艺措施,效果较好。

(1) 焊前对零件和焊丝进行真空除氢热处理。

(2) 焊前对零件和焊丝表面进行化学清洗,清洗后的零件最好能在当天焊完,否则要重新清理。

(3) 用高速钢丝轮打磨零件焊接区内外表面及接缝端面,所有被打磨的表面必须呈现金属光泽。

(4) 把零件内外表面用丙酮或无水酒精彻底清洗干净,同时清洗焊接夹具。

(5) 采用纯度不小于99.99%的高纯氩,且环境湿度不大于75%。

2.2 未焊透

2.2.1 未焊透缺陷的概念及危害

未焊透是指焊接接头根部未完全熔透的现象。这种缺陷不仅减少了焊缝的有效截面面积,降低了承载能力,更严重的是会在其周围产生应力集中,引起裂纹、造成破坏。特别是在动载荷工作条件下,未焊透缺陷对疲劳强度会造成很大影响。国外有规范规定,未焊透、裂纹和未熔合是焊接接头中最危险的3种缺陷,在任何航空产品和一、二级焊缝中是绝对不允许存在的,应予彻底消除。

2.2.2 未焊透现象及产生原因

为了提高装配精度、防止焊缝两侧错位,功能舱段壳体的前、后连接环和壳体圆筒之间的接缝采用了锁底结构,其锁底长度为4mm,厚度为1.5mm,如图3所示。

某厂家按此结构用自动钨极氩弧焊方法为我们焊

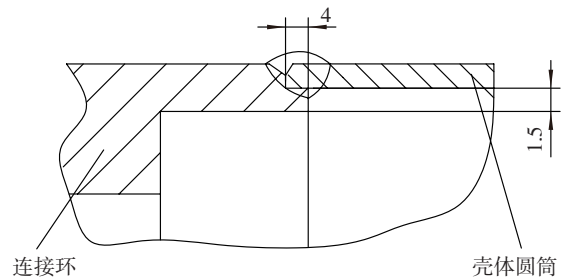


图3 功能舱段壳体接缝锁底结构焊接示意图

Fig.3 Lock bottom structure welding joints diagram of each function cabin

接了一批产品,但在例行试验时焊缝却出现了断裂,其位置是沿圆周焊缝中部开裂,长度大于1/2焊缝的长度。从焊缝断裂处可以看出,端环的锁底根部保持完好,根本就没有熔化,是典型的未焊透缺陷。事后对该批舱体的其他零件进行的复验表明,几乎所有舱体的全部圆周焊缝都存在不同程度的未焊透缺陷,有的贯穿于整个圆周长度。未焊透部位的剖面情况如图4所示。

可以看出,焊缝的熔化金属严重的偏向壳体圆筒一方。为了消除未焊透缺陷,进行了增大电流的焊接试验,但没有成功,在电流大到将壳体圆筒烧穿时,连接环的

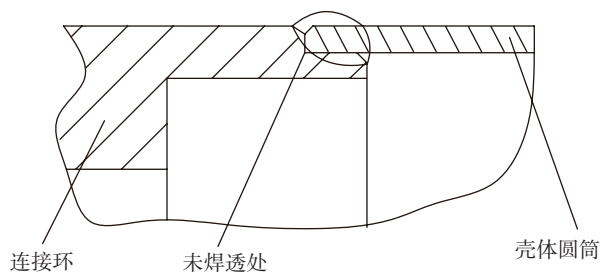


图4 未焊透缺陷示意图

Fig.4 Structure diagram of incomplete penetration

锁底根部仍保持完好,没有熔化。我们认为,这是前、后连接环和壳体圆筒的热容不平衡,两者相差过于悬殊造成的。连接环筒壁厚、热容大,又有夹具传热,而壳体圆筒筒壁薄、热容小,只能靠辐射散热,给予相同的热量,连接环升温慢、温度低、凝固快。而壳体圆筒的温度却迅速上升到熔化状态。因此,熔池会严重的偏向壳体圆筒一方,以致于电流大到使壳体圆筒烧穿时,连接环的接缝处仍未熔化。由此可知,单凭增加焊接电流、降低焊接速度,即增加焊接线能量是不能消除未焊透缺陷的。而锁底结构不但加剧了热容不平衡现象,而且使我们无法直接观察到焊缝是否存在未焊透缺陷。

2.2.3 消除未焊透缺陷的工艺方案和措施

(1) 改变前、后连接环的接缝形式和热源输入位置。

既然焊缝两侧的热容不平衡和锁底结构是造成根部未焊透的主要原因,我们采取了以下措施:

- 改变接缝形式: 焊接接头的接缝形式是指焊前待焊处的几何形状与尺寸。我们将原来的接缝两侧各开 $0.5\text{mm} \times 45^\circ$ 坡口改为前、后连接环一侧开 $2.0\text{mm} \times 30^\circ$ 、壳体圆筒一侧开 $1.2\text{mm} \times 45^\circ$ 的坡口。为了减少锁底结构对热容的影响而又不至于丧失定位的功能,将其 $1.5\text{mm} \times 4.0\text{mm}$ 的尺寸改为 $1.0\text{mm} \times 0.7\text{mm}$ 。

- 改变热源输入位置: 为了加大对前、后连接环的热量输入,焊接时焊枪钨极不是对中接缝而是偏向连接环一侧 $1.5\sim 2.0\text{mm}$ 。该工艺方案能基本解决未焊透缺陷,但当壳体圆筒内圆面与连接环锁底处外圆面出现大于 0.3mm 的间隙时,探伤就很难过关。

(2) 改变焊接方法。

- 采用电阻滚焊或连续点焊: 将连接环中锁底结构的厚度改成和壳体圆筒的厚度一致并加长到一定长度,接缝形式则变成电阻滚焊或连续点焊的搭接结构。我们用电阻滚焊方法进行了试验,焊接质量完全符合要求。电阻滚焊的特点是质量稳定、精度高,焊接变形小,特别适用于薄壁零件的搭接焊接,不存在未焊透缺陷,

热容不平衡对其焊接质量没有任何影响。

- 采用真空电子束焊: 真空电子束具有能量密度高、穿透能力强、热量输入迅速的特点,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。这一点已经在某小型导弹发动机壳体的焊接中得到了验证。

2.3 裂纹

2.3.1 裂纹的概念及危害

在焊接应力及其他致脆因素的共同作用下,焊接接头中局部区域的金属原子结合遭到破坏而形成的新界面之间的缝隙称为焊接裂纹。它具有尖锐的缺口和较长、较窄的长宽比特征,其中焊接接头在冷却到固相线附近的高温区时所产生的裂纹叫热裂纹,在冷却到 M_s 点温度以下时所产生的裂纹叫冷裂纹,焊件焊后在一定范围内再次加热而产生的裂纹叫再热裂纹。裂纹会减少承载面积、降低接头强度特别是疲劳强度、引起严重的应力集中,当应力水平超过裂纹根部的强度极限时就会扩展,是结构断裂破坏的起源,是最危险的焊接缺陷。在航空产品的焊接接头中,裂纹缺陷是绝对不允许存在的。

2.3.2 裂纹现象及原因

我们在 2006 年用手工氩弧焊方法焊接了一批由 30CrMnSiA 高强度结构钢制成的某模拟舱段壳体的端盖,焊后检验合格,但在库房存放近 3 个月后装配时发现,有大约 30% 的焊件在热影响区处出现了裂纹,有的还延伸到焊缝。事后查明,该批焊件由于担心热处理变形,焊后没有安排退火工序。

30CrMnSiA 是一种中碳马氏体合金结构钢,淬硬倾向较大,焊后其淬火组织是脆硬的马氏体,这种组织冷裂纹的敏感性较大,而端盖焊缝的结构形式又不同于薄壁筒体对接焊缝,存在有较大的拘束应力,焊后又没有及时退火来加以消除,加上焊接时焊缝金属在液态时对氢的溶解度很大,溶解有较多的氢,冷却后其溶解度急剧下降,向热影响区扩散,集聚于晶格缺陷处,造成局部应力集中,导致金属开裂,这是典型的延迟裂纹。

2.3.3 工艺措施

根据以上分析,我们在以后的生产中采取了以下措施,虽然个别零件仍出现裂纹,但从此杜绝了批量事故的发生。

(1) 焊前对零件和焊丝进行彻底清理,最大限度地杜绝外部氢气来源。

(2) 尽量减少焊接时的热量输入: 为了减小热影响区的宽度,避免脆性组织,采用了具有较小焊接线能量的自动脉冲钨极氩弧焊方法来代替手工氩弧焊。

(3) 焊前 $(250 \pm 10)^\circ\text{C}$ 整体预热,焊后置于 150°C

的烘箱中缓冷到室温并进行 $(680 \pm 10)^\circ\text{C}$, 保温 120 ~ 180min 消除应力退火。

2.4 错边

2.4.1 错边的概念及危害

由于零件的尺寸偏差、材料厚度偏差或焊前装配不当及焊接变形等因素造成焊缝两侧的基体中心线出现平行偏差的现象称为错边,如图 5 所示。焊接错边属于形状缺陷,它会影响焊件的尺寸精度,影响力线的均匀分布,严重时会产生应力集中。

2.4.2 焊接错边的产生原因及预防措施

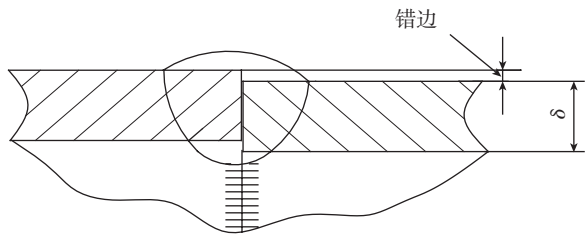


图5 焊接错边示意图

Fig.5 Structure diagram of welding misalignment

空空导弹弹体的接头形式主要是薄壁筒体的对接圆周焊缝,焊缝两侧一边是机加件,另一边是旋压件,两者的刚性不同,直径也存在偏差,焊缝两侧的错边一直是个比较棘手的问题。在整个圆周焊缝上,虽然大部分弧段错边量合格,但总有个别零件在较短的弧段上错边量超差,而且极难返修。为此我们采取了如下工艺措施,效果较好。

(1) 提高零件焊前的尺寸精度并进行选配,定位焊后检验把关,错边量合格后再进行缝焊。

(2) 电子束焊时采用图 3 所示的锁底结构,氩弧焊时采用图 6 所示的扣合式结构,利用机械加工来保证错边量。

(3) 采用内撑焊接夹具。

2.5 其他典型焊接缺陷

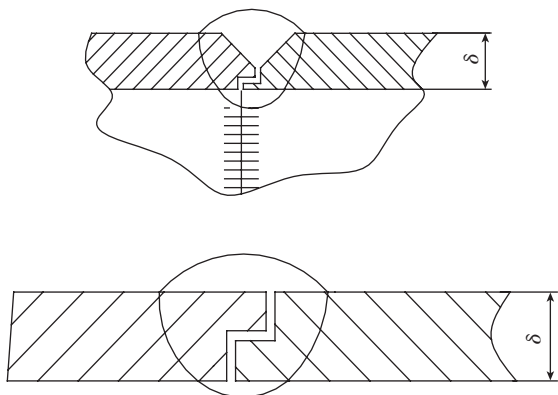


图6 圆周焊缝扣合式接缝结构示意图

Fig.6 Clip-lock-connection structure diagram of rounded weld

空空导弹弹体的圆周焊缝中还存在一些其他的焊接缺陷。

2.5.1 咬边

(1) 概念: 在工件上沿焊缝边缘的焊趾处所形成的沟槽或凹陷称咬边。

(2) 原因: 工件被熔化去一定深度,填充金属未能及时补充所致,电流过大、电弧过长、操作不熟练都会造成咬边。

(3) 危害: 减少接头的有效工作面积,造成严重的应力集中,是一种危险的焊接缺陷。

(4) 措施: 选择正确的焊接电流和焊接速度,电弧不要太长,提高操作水平。

2.5.2 未焊满

(1) 概念: 在焊缝表面形成的连续或断续的沟槽称为未焊满。

(2) 原因: 在电子束焊时常有发生,由于不能填加焊料,当间隙过大或束流过大时,往往会造成未焊满缺陷。

(3) 危害: 减小焊缝的工作面积。

(4) 措施: 减小和消除接缝间隙,重新调试焊接参数,对存在的未焊满缺陷可用修饰焊加以消除。

2.5.3 弧坑

(1) 概念: 焊缝收尾处产生的凹陷部分称为弧坑。

(2) 原因: 熄弧过快、收弧方法不当、焊接电流过大或熄弧时没有衰减电流。

(3) 危害: 弧坑会减弱焊缝收尾处的强度,甚至会在收尾处产生裂纹,是非常有害的焊接缺陷。

(4) 措施: 提高操作技能、焊接电流不要过大,正确使用熄弧时的衰减电流。

2.5.4 夹渣、夹钨

残留在焊缝金属中的非金属夹杂物统称夹渣;钨极氩弧焊时钨极进入到焊缝中的钨粒叫夹钨,其危害与气孔类似。

3 结束语

焊接缺陷破坏了接头结构的完整性和连续性,使产品的安全性和可靠性受到威胁,这对于焊接质量要求较高、工作条件严酷的空空导弹弹体焊缝显得尤为突出。随着现代先进空空导弹向着远程化、超音速、高过载的方向发展,对焊接接头的缺陷就愈加敏感,在未来的焊接加工中,如何提高焊接质量,尽量减少和避免缺陷的产生并制订预防和返修措施,都需要我们进行研究和探索,以满足空空导弹弹体的焊接要求。

(责编 深蓝)