

一种相控阵雷达用耐气压冷板的焊接工艺方法研究

王志鹏 冉振旺 杨文静 肖爱群 许明珠

(北京华航无线电测量研究所, 北京 100013)



摘要: 某相控阵雷达冷板对焊缝提出了气密性要求, 为实现装配, 还要求焊接后平面度公差不得超过 0.1mm。使用真空钎焊、激光焊、电子束焊方法分别对耐气压冷板进行焊接试验, 对焊接变形及密封性检测的情况进行了分析, 确定了满足冷板使用要求的焊接工艺方法, 通过对焊接方法的改进, 使形位公差、气密性指标均得到很好的保证, 解决了该冷板焊接的技术难题。

关键词: 冷板; 真空钎焊; 激光焊; 气密性

Research on Welding Processes of A Pressure-resistant Cooling Plate for Phased Array Radar

Wang Zhipeng Ran Zhenwang Yang Wenjing Xiao Aiqun Xu Mingzhu

(Beijing Huahang Radio Measurement & Research Institute, Beijing 100013)

Abstract: A new sort of cooling plate, pressure-resistant cooling plate, is proposed in the phased array radar. For its new filler in the plate, a higher requirement of air tightness is necessary. What's more, its flatness tolerance after welding should be no more than 0.1mm so that a very thin PCB assembles onto the plate. In order to meet the requirement, three welding methods of vacuum brazing, laser welding and electron beam welding were carried out. By testing the welding deformation and air tightness, the advantages and disadvantages of the welding methods were compared. As a result, an optimized welding process was formed to solve the cooling plate welding technical problems.

Key words: cooling plate; vacuum brazing; laser welding; air tightness

1 引言

相控阵雷达是制导技术的重要发展方向, 随着其技术的不断发展, 元器件的集成度越来越高, 散热量越来越大, 对冷板散热效率和密封技术的要求也逐步提高^[1, 2]。由于体积、重量的严格限制, 某相控阵雷达冷板均为含内部腔体的薄板结构(厚度 5~7mm), 其与印制板的安装面平面度要求高, 如何保证冷板焊接后变形尽量小(平面度公差 $\leq 0.1\text{mm}$)是一个难题。

目前, 用于铝合金冷板焊接变形较小的工艺方法, 主要有激光焊^[3]、电子束焊^[1, 5]和钎焊^[1~7]。但无论哪种焊接方法, 用来焊接的铝合金冷板一般都为厚

板结构(15mm 以上)^[1, 4, 5], 密封技术都是对焊缝提出水压检测要求^[4~7]。由于该雷达新的使用需求, 在原有冷板焊接的水压要求的基础上又同时提出了气密性要求, 要求在 0.5MPa 的水压、气压条件下均不发生泄露。对该冷板的焊接工艺方法进行研究, 掌握不同焊接方法对焊接变形、焊缝气密性的影响, 对于该冷板在相控阵雷达上的应用具有重要意义。

2 试验方法

作者简介: 王志鹏(1987-), 助理工程师, 材料加工工程专业; 研究方向: 钎焊工艺。

收稿日期: 2014-06-26

2.1 试验材料

耐气压冷板由底板和盖板零件焊接而成,零件材料是铝合金,牌号为 3A21,试件形式如图 1 所示,

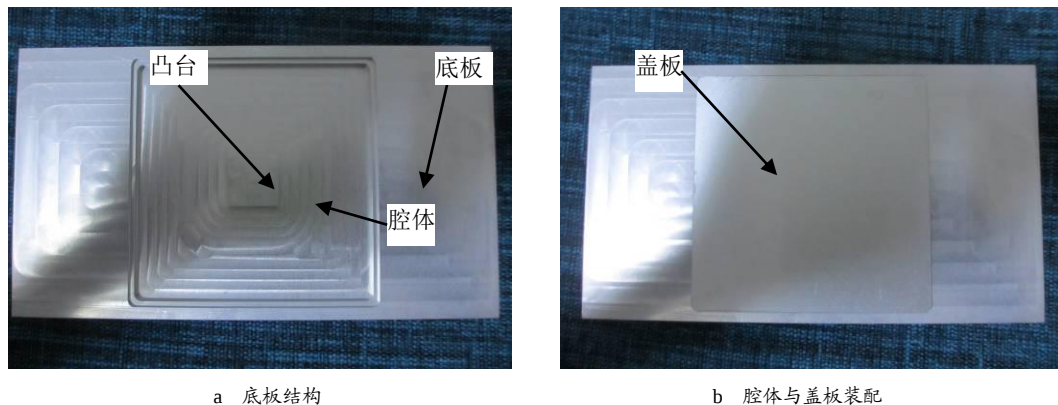


图 1 耐气压冷板焊接试件形式

2.2 试验方法

2.2.1 焊接方法分析

耐气压冷板共有两处焊缝需要焊接,凸台与盖板之间的焊缝以及腔体和盖板周边的焊缝。

凸台与盖板之间焊缝在腔体内部,为搭接焊缝,这种焊缝形式宜于使用钎焊的方法来实现连接,目前应用于铝合金冷板封焊的钎焊方法主要有氮气保护钎焊和真空钎焊,但是氮气保护钎焊由于使用了钎剂,钎缝抗蚀性能较差,考虑到冷板后续处理(如表面处理),选用真空钎焊的方法焊接。

腔体和盖板周边焊缝是保证腔体密封性最重要的焊缝,考虑到平面度公差要求,选择焊接变形较小的真空钎焊、激光焊、电子束焊进行试验对比,最终选择经济、可靠性好的焊接方式。

通过控制激光的入射光束功率,激光焊可以有两种不同的焊接机制——激光深熔焊接和激光热导焊接,两种方式在密封性和焊接变形各有优势,所以使用两种机制进行焊接试验。电子束焊焊缝深宽比最大可达到 50:1,对连接强度和密封性极为有利,焊接热影响区小,真空条件,焊接后接头质量较好。真空炉中钎焊能精确控制温度加热均匀,变形小,钎焊质量好。使用真空钎焊方法焊接时,可以一炉同时实现两处焊缝的焊接,可以降低成本,同时焊接后冷板的变形也小。但是由于钎焊的强度较激光焊、电子束焊低,在盖板厚度只有 1.5mm 的情况下焊缝强度能否满足密封性及变形要求是这种方法的关键所在。

3 试验结果与分析

底板外形尺寸为 110mm×196mm,其内部主要结构包括腔体和凸台,盖板厚度为 1.5mm。

3.1 腔体和盖板周边焊缝的焊接与变形情况

3.1.1 激光焊

通过调整工艺参数,激光深熔焊和激光热导焊机制都能实现腔体与盖板周边的连续焊接,如图 2 所示。

由图 2 可见,两种焊接方法各有优点,深熔焊的熔深、熔宽更大,对密封性有利,热导焊的焊缝更美观。但是两种方式都将使试件发生弯曲变形。使用激光深熔焊的方式进行焊接,焊接后试件的平面度公差在 1mm 以上,使用激光热导焊的焊接方式,焊接后试件的平面度公差在 0.5mm 以上,这给后续的加工造成困难。

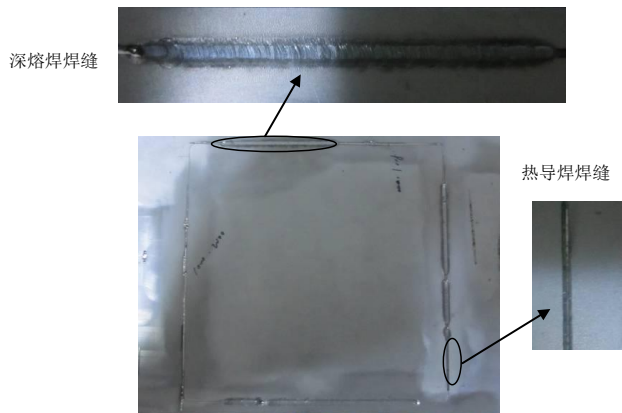


图 2 腔体结构焊接试件焊接情况

另一方面,激光热导焊过程中容易出现气孔缺陷。由于激光焊在保护气氛中进行,同时冷板腔体内外都存在着气体,在激光扫过焊缝的瞬间,很有可能内部气体向外散逸过程中在焊缝中间形成气孔,如图 3 所示,经过进一步的试验,气孔缺陷可以通过补焊

来消除。

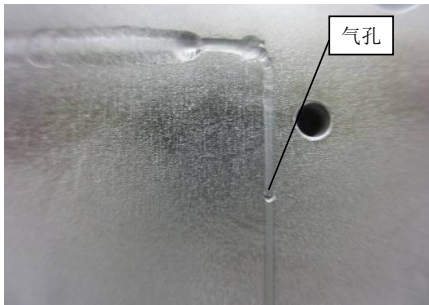


图 3 激光焊过程中的气孔缺陷

3.1.2 电子束焊

使用电子束焊试件过程中，由于快速加热及随后冷却产生的高硬度，试件焊接后冷却过程中出现裂纹，裂纹经过多次补焊后，依然无法消除。由于裂纹的存在，冷板不能满足密封性要求，同时，由于焊缝在冷板中轴线一侧导致的变形叠加，也使得试件平面

度公差超过了 0.6mm，同时，电子束焊成本很高，经过综合分析，认为本方法不是加工本零件的最佳方法。

3.1.3 真空钎焊

为了满足相变构件腔体的密封性要求，同时兼顾焊接变形的控制，采用了不同的真空钎焊方式，在盖板不倒坡口、钎料量较少时，焊缝连续，外形较好，这种情况下试件变形很小。在盖板倒坡口 0.5mm、钎料放置量多时，试件变形稍大，但密封性能更好。通过选择合适的钎料量，可实现变形量很小的连接，在 0.05mm 以内。但是如果盖板及底板加工公差控制不好，在腔体周边的加工圆角处有时出现焊接缺陷，经过进一步试验，该缺陷可以通过补焊消除。三种焊接方法焊接腔体和盖板周边焊缝的焊接与变形情况对比如表 1 所示。

表 1 腔体和盖板周边焊缝的焊接与变形情况对比

序号	焊接方法		焊接情况	焊接变形（焊后平面度公差）
1	激光焊	深熔焊	无缺陷	≥1mm
		热导焊	容易出现气孔缺陷，可补焊	≥0.5mm
2	电子束焊		裂纹缺陷，不可补焊	≥0.6mm
3	真空钎焊		圆角处有时出现缺陷，可补焊	≤0.05mm

3.2 密封性检测

3.2.1 水压爆破试验验证

使用真空钎焊方法焊接的冷板进行水压爆破试验验证时，加水压至 0.6MPa 并保压的过程中，焊缝无漏水现象，试样无屈服变形现象，且压力未出现下降现象，试件完好，如图 4 所示。

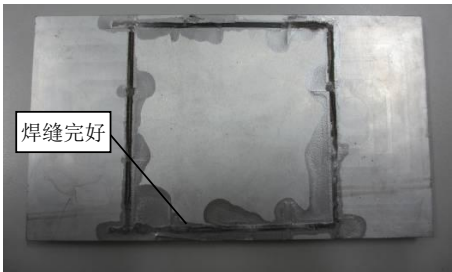


图 4 0.6MPa 水压爆破试验后的试件形貌

同时无水压下降情况，周边焊缝处也无漏水现象，中间凸台与盖板之间焊接处未变形。继续增大水压，盖板变形量逐渐增大，腔体不断膨胀，在水压作用下，底板发生严重的变形，但是周边焊缝及中间焊缝并无开裂迹象，同时无水压下降情况。

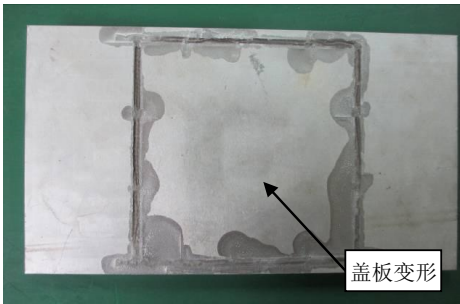


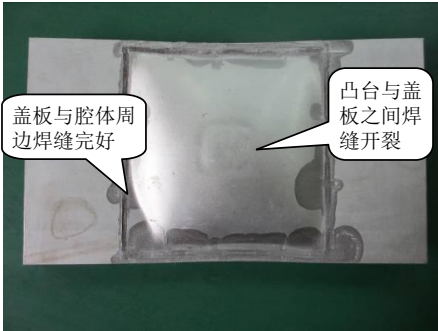
图 5 水压 0.8MPa 时的试件形貌

继续增大水压，当水压增加至 0.8MPa 时，可以观察到，在水压的作用下，盖板发生屈服变形，其变形情况如图 5 所示。

由图可见，变形发生在无凸台与盖板焊接的部分，变形方式为腔体向外膨胀，但是底板并未变形、

当压力达到 1MPa 时，腔体内部凸台与盖板之间的焊缝开裂，腔体体积发生突变导致压力表示数骤然下降，但周圈焊缝并未发生开裂，继续加压至 2MPa，周边焊缝也并未发生开裂，试件的形貌如图 6 所示。此时试件的变形可达几毫米，腔体中间已经完全膨胀

成近球形，耐压性已远远超过了母材设计要求，可见



a 焊缝形貌

真空钎焊的焊缝可以满足密封性要求。



b 试件变形情况

图 6 水压 2MPa 的试件形貌

考虑到实际应用需求，凸台与盖板之间焊缝的耐压性达到 1MPa，腔体与盖板周边焊缝的耐压性可以承受 2MPa 的水压而不发生断裂，真空钎焊的焊缝可以满足密封性要求，通过改变凸台数量和形式可以控制在压力下试件的变形。使用激光焊的冷板也可以通过水压爆破试验验证，其情况与真空钎焊类似，在此不再赘述。

3.2.2 气密性检测结果与分析

将气密性检测的结果分类汇总，如表 2 所示。由表可见，真空钎焊的冷板试件气密性检测一次性通过率更高，激光焊接气密性检测的一次性通过率较低，激光热导焊方法气密性检测的一次通过率很低。激光

焊的气孔缺陷和真空钎焊圆角处的焊接缺陷是造成一次性气密性检测不合格的主因，但是经过补焊的冷板外观很差，需要进一步优化工艺。

表 2 一次性气密性检测结果

焊接方法		试件数	合格数	合格率/%
激光焊	深熔焊	3	2	66.7
	热导焊	2	0	0
真空钎焊	钎料多	3	3	100
	钎料少	4	3	75

经过以上对比分析，使用真空钎焊、激光焊、电子束焊焊接冷板的优缺点，如表 3 所示。

表 3 冷板焊接方法优缺点

序号	焊接方法	优点	缺点
1	激光焊	成本一般，使用深熔焊机制强度高，使用热导焊机制，焊接热输入小	试件变形较大，易产生气孔缺陷，可补焊
2	电子束焊	深宽比大，强度高，真空环境，适于铝类零件焊接	试件变形较大，易产生裂纹缺陷，且出现裂纹时不易补焊，成本高
3	真空钎焊	真空环境，适于铝类零件焊接，试件变形小，成本低，可补焊	强度较另两种方法低，但通过结构及工艺改进可达使用要求

由于产生裂纹缺陷将直接导致冷板不能满足密封性指标，同时，试件变形大将直接导致冷板不能满足尺寸精度要求，所以优先选用真空钎焊的方法进行冷板的焊接。

3.3 真空钎焊工艺优化

为了保证冷板的焊接合格率，同时改善冷板的外观，对真空钎焊工艺进行了优化，采取了相应的措施：

a. 装配间隙控制。真空钎焊焊接冷板时圆角处容易发生泄露，所以对该处间隙严格控制，严格控制加工过程中的尺寸精度；

b. 改变钎料布置方式。外置钎料虽然可以满足设

计要求的密封性要求和尺寸要求，但是外观并不美观，为此采用一种内置钎料方式来进行冷板的焊接，在满足密封性要求和尺寸精度的前提下改善了外观。

c. 采用合理的焊缝形式提高强度。通过增大焊接面积的方法可以增大钎焊接头的强度，增大信号处理冷板零件槽底台阶面积来增大焊接面积，从而提高真空钎焊的焊接强度。

经过优化后的冷板真空钎焊的焊接合格率达到 了 95%以上，满足了焊接变形及气密性指标要求，保证了该冷板在某相控阵雷达上的应用。

（下转第 66 页）