波导双定向耦合器制造工艺

宋为民，朱子昂
中国电子科技集团公司第三十八研究所　安徽合肥　230088

摘要：根据X波段波导双定向耦合器的设计要求，结合工艺特点，制定合理的零件拆分方法，在波导腔体加工时保证耦合孔形状和位置精度，将封闭环尺寸合理分配到组成环上；通过定位台阶的设计，首先电子束焊接匹配块，然后真空钎焊盖板，形成耦合器封闭腔体。工艺路线合理可行，满足设计和环境适应性要求，为高频段波导双定向耦合器的设计制造提供了参考。

关键词：双定向耦合器；波导腔体；定位；尺寸链计算；制造工艺

1　序言

定向耦合器是一种具有方向性的功率分配元件，可以利用耦合出的功率进行监测或功率的调节，它是四端口元件，由称为主传输线（主线）和副传输线（副线）的两段传输线组合而成的[1]。定向耦合器的结构形式多种多样，可分为波导、微带等形式[2]。波导结构承载功率大，在大功率微波传输中应用较多。波导结构主要工艺难点在于耦合缝或孔的精度保证和连接可靠。

图1所示某X波段波导双定向耦合器通过波导宽边的孔耦合，传输微波高功率，集成度高，可靠性要求高，工艺实现有难度。对其结构形式和工艺难点进行分析，通过零件拆分设计、定位台阶设计、尺寸链工艺性优化设计、电子束焊和真空钎焊二次焊接工艺设计等，最终完成了波导双定向耦合器的制造。样件检验结果表明，样件尺寸符合图样要求，电性能满足功能要求，制造工艺合理可行，为同类产品生产提供了借鉴。

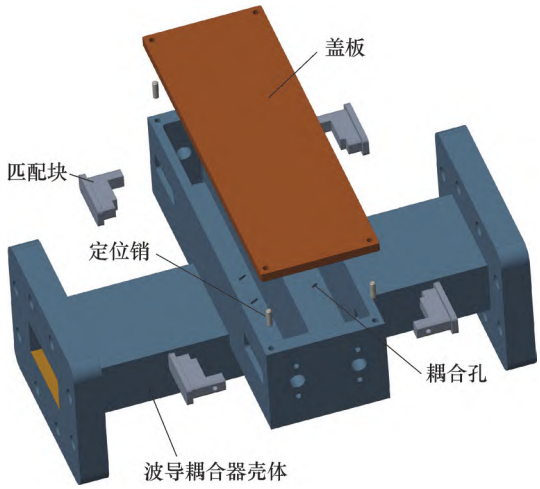


图1　双定向耦合器示意

2　结构组成

波导双定向耦合器主要由主线波导、副线波导、盖板、匹配块和插座等组成。耦合孔形状尺寸如图2所示，匹配块如图3所示。X波段的波导口径为22.86mm×10.16mm，工作频率为9～11GHz。耦合波导之间分隔的金属壁壁厚为1mm，在金属壁上共设计了4个耦合孔，其中2个

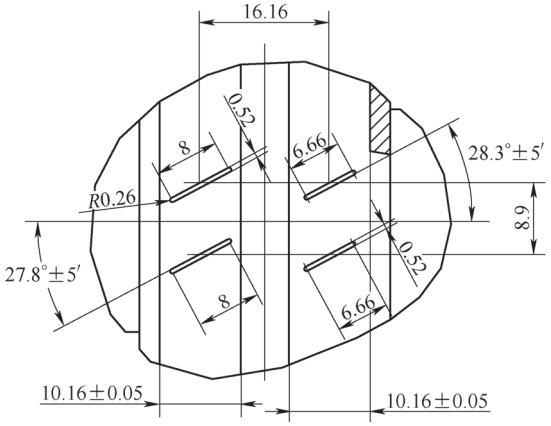


图2　耦合孔形状尺寸

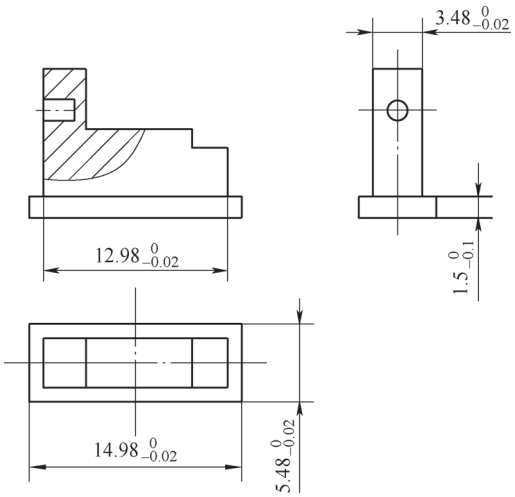


图3　匹配块

0.52mm×8mm的*R*0.26mm孔倾角为27.8°±5′，2个0.52mm×6.66mm的*R*0.26mm孔倾角为28.3°±5′。

3　工艺难点

由于在制造、存储、运输和安装过程中涉及陆地地面环境，在使用过程中涉及沿海高山、岛礁环境，双定向耦合器在室外工作有要求，环境温度要求－40～＋50℃，振动、冲击、霉菌及盐雾等按GJB 74A—1998相关规定要求执行，因此盖板和腔体要可靠连接，优选真空钎焊连接。

电信要求匹配块和内腔距离尺寸精度为（1.1±0.03）mm，这是装配后形成的封闭环，由于匹配块是在封闭腔内，加工不可达，因此只能胶结或焊接，根据环境适应性要求，焊接更优。微波器件制造中的真空铝钎焊无法运用，主要是因为匹配块连接面和盖板钎焊面互相垂直，采用阶梯真空钎焊时，真空状态下重力作用会影响钎焊质量。

封闭环公差±0.03mm，即组成环公差带加起来不能超过0.06mm。工作频段高，零件尺寸较小。

4　工艺方案

根据双定向耦合器结构特点进行零件设计，分成波导、盖板、匹配块和定位销等，如图1所示。

（1）方案一：波导拼焊方案　波导定向耦合器的主线波导和副线波导分别成形，再真空钎焊成整体。需要焊主线波导和副线波导，焊匹配块，焊盖板。存在盖板焊接面和波导焊接面互相垂直的问题，另外，波导耦合孔加工精度在单个零件时能保证，但焊接成整体后，角度精度会有损失，相对位置精度也有损失。

（2）方案二：耦合体整体加工方案　尽可能整体加工，特别是耦合孔处。整体波导腔体具有加工可达性，但是由于匹配块加工不可达，因此考虑分成3个零件，即波导腔体、盖板和匹配块。为保证环境适应性和可靠性，运用焊接连接。为保证位置的准确，盖板运用销钉定位，匹配块通过设计定位台阶和波导腔体连接成整体。

由于匹配块的连接面和盖板连接面互相垂直，两处连接无法都使用真空铝钎焊，先焊匹配块，再焊盖板，匹配块运用熔焊，盖板运用钎焊，这样就不会互相影响。熔焊要定位准确，以保证匹配块尺寸精度要求。因此将匹配块连接面引出零件，利用电子束焊进行焊接，电子束焊接处可以耐受后续盖板真空钎焊的温度（最高温度610℃），根据真空钎焊的工艺要求，零件材料选择3A21铝合金。

波导腔体可以方便耦合孔的位置、尺寸以及耦合壁厚度等的精确度控制。经过分析采用耦合体整体加工方案。

5　工艺实现

5.1　加工成形

波导腔体、盖板和匹配块采用机械加工方法成形，属于常规机床加工。

5.2　匹配块的定位

匹配块和波导腔体采用定位台阶定位，匹配块结构如图3所示，波导腔体结构如图4所示，定位台阶参见图4中的I放大图。

通过匹配块12.98mm×3.48mm台阶和波导腔体定位，同时以销钉固定，焊接14.98mm×5.48mm台阶处，保证了焊接可达性，同时焊缝和定位处错开，减少焊接热对定位的影响。

5.3　尺寸链工艺性优化设计

为保证装配尺寸（1.1±0.03）mm（见图4），分析组成环尺寸。

按图3、图4上所标注的尺寸公差$84.86^{0}_{-0.1}$mm、（69.68±0.03）mm和$12.98^{0}_{-0.02}$mm计算封闭环：封闭环基本尺寸＝（84.86－69.68－12.98）÷2＝1.1（mm）；封闭环公差带＝0.1＋0.06＋0.02＝0.18（mm）；封闭环上偏差＝（0＋0.03＋0）÷2＝

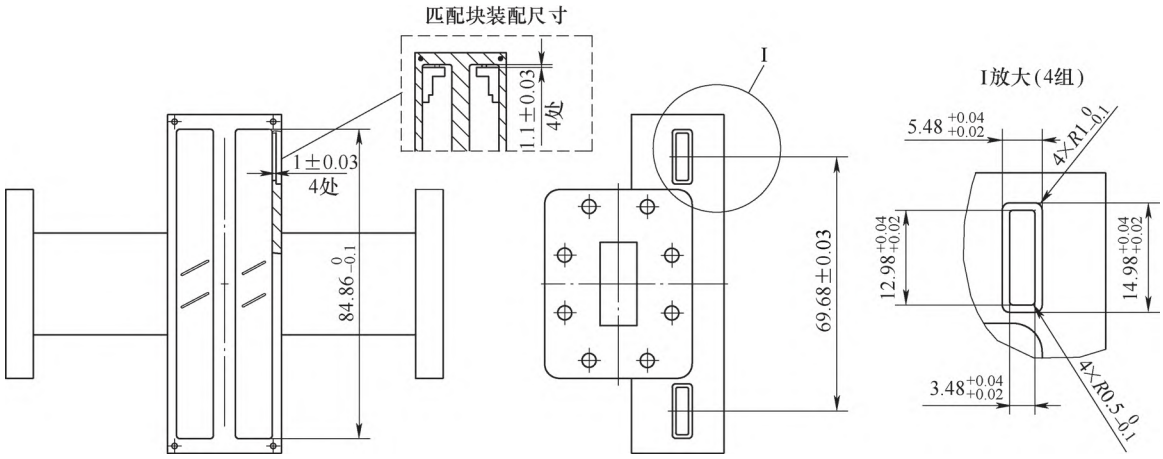


图4　波导腔体

0.015（mm）；封闭环下偏差＝（－0.1－0.03－0.02）÷2＝－0.075（mm）。不能保证装配尺寸（1.1±0.03）mm要求。

为保证封闭环尺寸公差，重新修正各组成环公差，按双向对称分配公差[3]，即（84.86±0.01）mm、（69.68±0.01）mm和（12.98±0.01）mm，机床加工手段和条件能达到这一要求。零件达到加工要求即可保证封闭环尺寸精度。

5.4　焊接工艺设计

电子束焊是熔焊，耐受温度高，安排在钎焊前，焊缝深度设计值为1.5mm，单个焊缝长度约为41mm，焊接电流为7～12mA，聚焦电流为500～530mA，焊接速度为13～18mm/s。

电子束焊匹配块，经计算，焊缝离法兰最近距离1.5mm，电子束不会被遮挡。

盖板采用真空钎焊方式完成零件成形。真空焊接面保持水平，辅助以工装压紧固定，有利于形成良好的焊接面。

6　结束语

本文以定向耦合器为例进行结构分析，制定拆分设计与组焊工艺方案。本方案拆分零件数量少，零件定位关系清晰，主要精度在波导腔体加工时保证，封闭环尺寸合理分配到组成环上，对2处相互垂直的焊接面，通过定位台阶的设计，先电子束焊接匹配块，再真空钎焊盖板，形成耦合器封闭腔体，满足电信和产品环境适应性要求，为同类定向耦合器的制造工艺提供了参考。

参考文献：

[1] 闫润卿. 微波技术基础[M]. 北京：北京理工大学出版社，2020.

[2] 张翠翠，王益，王建忠. 高功率微波宽带波导定向耦合器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报，2019（6）：1036-1040.

[3] 李舒燕. 公差与配合[M]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2007.

MW 20240923

专家点评

文章以定向耦合器为研究实例进行结构分析，主要工艺难点在于耦合孔的加工精度，以及盖板和腔体的连接可靠性。作者通过技术创新，在零件拆分、定位台阶设计、尺寸链优化及二次焊接等方面采取工艺改进措施，完成了耦合器零件的加工与整体焊接。

文章的亮点是耦合器拆分设计与组焊工艺的完美结合，结构合理，工艺可行，定位准确，焊接牢固。先进行拆分零件设计，再采用耦合体整体加工方案。通过电子束熔焊匹配块、真空钎焊盖板的方式完成零件加工，为同类产品的制作提供了借鉴。