



紧凑型聚变能实验装置(BEST)
偏滤器原型件技术规范

文件编号	BEST-P31-TS-010
文件版本	V2.5
编写时间	2024年04月09日

紧凑型聚变能实验装置(BEST) 偏滤器原型件技术规范

(摘要：本文件规定了“紧凑型聚变能实验装置(BEST)”的偏滤器原型件制造的材料、部件、设备、服务等应满足的技术要求。)

目 录

1.	前言	4
2.	目的	4
3.	采购范围	4
4.	参考文件	5
5.	缩略词	6
6.	总体制造流程及工艺	6
7.	工艺认证	6
	7.1 CuCrZr 材料性能	6
	7.2 CuCrZr/316L 板连接性能	7
	7.3 PFU 支撑腿	7
	7.4 CuCrZr / 316L 管-板对接工艺	7
8.	内靶板	8
	8.1 采购范围	8
	8.2 材料	9
	8.3 PFU 技术要求	9
	8.4 内靶板模块技术要求	12
9.	外靶板	16
	9.1 采购范围	16
	9.2 材料	17
	9.3 PFU 技术要求	17
	9.4 外靶板模块技术要求	20
10.	支撑盒体	24
	10.1 采购范围	24
	10.2 材料	24
	10.3 技术要求	24
11.	偏滤器原型件整体集成	27
	11.1 采购范围	27
	11.2 材料	28
	11.3 技术要求	28
12.	进度节点及交付物	31
13.	质量保证	32

14. 文件要求33

1. 前言

本文档规定了“紧凑型聚变能实验装置(BEST)”的偏滤器原型件制造的材料、部件、设备、服务等应满足的技术要求。

2. 目的

本文档将用于 BEST 偏滤器原型件的采购、制造和验收。

3. 采购范围

本次采购为 1 个偏滤器原型件，包括内靶板 PFC 部件 2 个，内靶板 PFC 部件 1 个，外靶板 PFC 部件 1 个，支撑箱体部件 1 个。根据 BEST 装置偏滤器系统设计要求 [1]，偏滤器原型件的制造包括各部件的制造、装配以及过程中的各项测试：

1) 内靶板：

- 面向等离子体元件 (PFU)，包括平板和穿管结构及过渡连接和水管；
- 过渡支撑，不锈钢组焊件（包含 316L 和 XM-19）；
- 过渡支撑组焊及与 PFU 的装配；
- PFU、PFC 测试；

2) 外靶板：

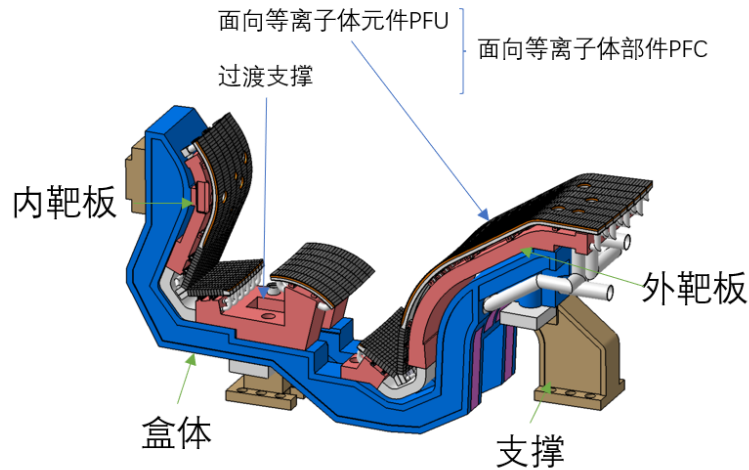
- 面向等离子体元件 (PFU)，包括平板和穿管结构及过渡连接和水管；
- 过渡支撑，不锈钢组焊件（包含 316L 和 XM-19）；
- 过渡支撑组焊及与 PFU 的装配；
- PFU、PFC 测试；

3) 支撑箱体：

- 盒体的 316L 不锈钢组焊件；
- 支撑结构的加工焊接；
- 支撑箱体测试；

4) 原型件装配：

- 支撑箱体与内靶板、外靶板的装配；
- 原型件测试。



标准偏滤器模块示意图

4. 参考文件

- [1] BEST-P31-DDD-002_BEST 系统工程设计描述文档 V2.0
- [2] BEST 系统工程设计要求 V1.0, 2022.10.07
- [3] BEST 主机工程设计标准手册 V1.0, 2021.10.08
- [4] BEST-P31-DDD-012_BEST 偏滤器 PFC 预研件技术要求_V1.1
- [5] BEST-P31-DDD-017_BEST 偏滤器 PFC 预研报告_V1.0
- [6] BEST-P31-DDD-018_BEST 偏滤器装配精度及零件制造精度要求 V1.0
- [7] BEST-P31-TS-001_BEST 偏滤器系统不锈钢板 316L 技术规范_V1.0
- [8] BEST-P31-TS-002_BEST 偏滤器系统铬锆铜板技术规范_V1.1
- [9] BEST-P31-TS-003_BEST 偏滤器系统钨板技术规范_V1.1
- [10] BEST-P31-TS-004_BEST 偏滤器系统 XM-19 技术规范_V1.0
- [11] BEST-P31-TS-005_BEST 偏滤器系统合金 Inconel625 技术规范_V1.0
- [12] BEST-P31-TS-006_BEST 偏滤器系统合金 Inconel718 管材技术规范_V1.0
- [13] BEST-P31-TS-007_BEST 偏滤器系统无氧铜技术规范_V1.1
- [14] BEST-P31-TS-008_BEST 偏滤器系统铬锆铜管技术规范_V1.1

5. 缩略词

缩略词	全称
BEST	Burning plasma Experimental Superconducting Tokamak 燃烧等离子体超导托卡马克
PFU	Plasma Facing Unit 面向等离子体元件
PFC	Plasma Facing Component 面向等离子体部件
FDR	Final Design Review 最终设计评审
TIG/GTAW	Tungsten Inert Gas Welding/Gas Tungsten Arc Welding 惰性气体保护焊
EBW	Electron Beam Welding 电子束焊
PT	Penetration Testing 渗透检测
UT	Ultrasonic Testing 超声波检测
RT	Radiographic Testing 射线检测
HIP	Hot Isotopic Pressure 热等静压
WIP	Welding and Inspection Plan
WPQR	Welding Procedure Qualification Record
WPS	Welding Procedure Specification

6. 总体制造流程及工艺

原型件分为内靶板、外靶板和支撑盒体三个部件。内靶板和外靶板为 PFC，主要有面向等离子体元件 PFU 和过渡支撑组成，制造过程主要包括 PFU 制造，过渡支撑加工以及 PFU 与过渡支撑的焊接装配。支撑盒体为不锈钢焊接件。

原型件的整体集成为内靶板、外靶板和支撑盒体的集成装配。

7. 工艺认证

7.1 CuCrZr 材料性能

对 PFU 用 CuCrZr 板/管，在确定的制造工艺热处理后开展材料性能测试，需满足下表。

检测项	RT, 至少 3 组	250C, 至少 3 组	测试标准

强度 Mpa	280	220	GB/T 228.1 GB/T 228.2
屈服 Mpa	175	150	
伸长率%	15	14	

7.2 CuCrZr/316L 板连接性能

对平板结构 CuCrZr/316L 复合板结合面进行缺陷和性能检测：

- 1) 对于爆炸焊工艺，结合界面为波状结构，波纹细腻均匀，波纹高度 $\leq 1\text{mm}$ ；
- 2) 超声探伤（UT）复合界面不允许出现 $\geq \text{Ø}2\text{mm}$ 的当量缺陷；
- 3) 热处理后拉伸强度：不低于母材强度的 95%，测试不少于 3 组。

7.3 PFU 支撑腿

对平板和穿管结构支撑腿，进行拉伸强度和疲劳测试。测试件需包含完整的支撑结构，并经甲方批准。

检测项	接收标准	说明
拉伸强度	25MPa	RT，加载速率 20-60 N/s，至少 5 组
疲劳	15000 次 (<1Hz)沿加载轴方向的变形应小于 0.3 mm	RT，0-2kN

7.4 CuCrZr / 316L 管-板对接工艺

对穿管结构 CuCrZr 水管与 316L 水管连接接头，进行焊接检测，焊接准备工作包括：

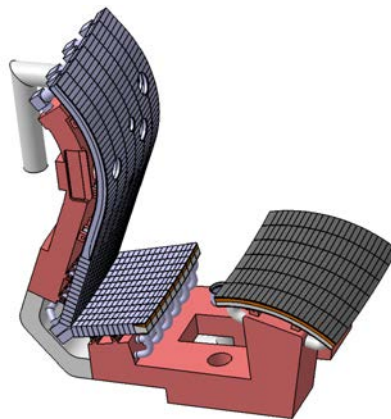
项目	标准
pWDP	EN ISO 15609-1:2005, -3:2004 EN ISO 15614-1:2005+A1:2008 +A2: 2012, -11:2002
人员资质	EN ISO 9606-1, ISO 9712:2012
焊材	Co < 0.20wt%，EN 10204 Type 2.2 或 3.1

焊缝检测工作包括：

检测	范围	标准	验收
目视	100%	EN ISO 17637:2011	Quality level B of EN ISO 5817:2014 or EN ISO 13919-1:1996
射线	100%	EN ISO 17636- 1:2010	
表面	100%	EN ISO-3452- nn:2013	
微观	≥1 剖面	EN ISO-17639:2013	
弯曲	2 正弯, 2 背弯	EN ISO 15614-1:2005+A1:2008 +A2: 2012, -11:2002	EN ISO 15614-1:2005+A1:2008 +A2: 2012, -11:2002
拉伸	≥5 件	EN ISO 6892-2:2011; at 150C	> 200 MPa at 150C
漏率	≥5 件	扭转 10000 次 (≤1 Hz) 0.1% @RT; 四点弯曲 (load is applied by weights)	≤10 ⁻¹⁰ Pa m ³ /s

8. 内靶板

内靶板包括内垂直靶板、水平靶板和 DOME 的 PFU 平板、穿管结合结构，以及内靶板过渡支撑结构。



内靶板示意图

平板结构和穿管结构可采用热等静压、爆炸焊、钎焊等工艺方案一种或多种组合，方案需经甲方批准。平板与穿管结构通过 Inconel 625 过渡管焊接连接，如供应商采用不同方案，须经甲方批准。

8.1 采购范围

原型件的内靶板包括一个完整偏滤器内靶板模块，零部件数量如下。

项目	结构	数量
内垂直靶板 PFU	平板×6+穿管×12	6
内水平板 PFU	穿管	12
DOME PFU	平板	6
过渡支撑	不锈钢焊接	1
内靶板 PFC 模块集成	N/A	1

8.2 材料

主要原材料如下表。其中，钨铜片为成品采购，可由甲方统一采购或制定供应商。

材料	采购标准
钨	BEST-P31-TS-003
无氧铜	BEST-P31-TS-007
钨/铜片	- 整体尺寸误差不超过±0.05mm; - 无氧铜层厚度误差不超过±0.1mm; - 表面粗糙度小于 Ra 0.8mm; - 结合面当量缺陷不超过 2mm
铬锆铜板	核聚变装置用铬锆铜板材 Q/DLZ 01—2011
铬锆铜管	BEST-P31-TS-002
316L 钢板	BEST-P31-TS-001
316L	GB 20801-2020 压力管道-工业管道
XM-19	BEST-P31-TS-004
Inconel 625	BEST-P31-TS-005
Inconel 718	BEST-P31-TS-007
焊料	焊丝、焊材提供质保证书，包含元素含量

8.3 PFU 技术要求

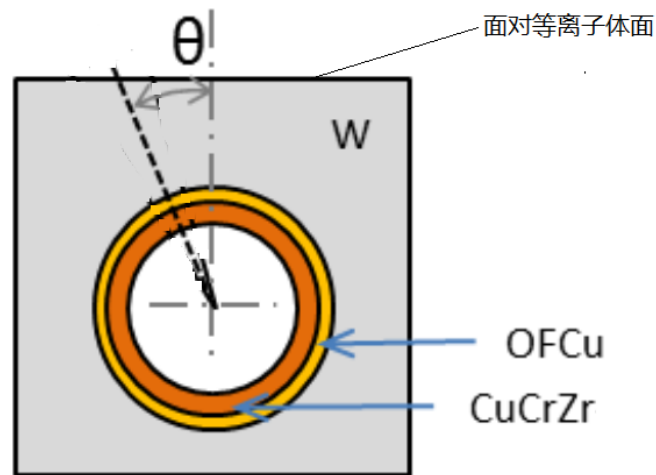
- 钨铜块 (monoblock)

1) 表面平整、光洁，无溢出物；

- 2) 当量缺陷尺寸不允许超过 $\varnothing 2\text{mm}$;
- 3) 对于 $\varnothing 1.6\text{-}\varnothing 2\text{mm}$ 缺陷, 需要进行判定:
 - a) 提交不合格项报告;
 - b) 专家评议, 决定是否让步接收;
- 4) 总的缺陷面积不超过连接面积的 5%;
- 5) 不允许低于以上标准的两个或以上的缺陷存在, 除非两个缺陷之间的距离大于最大的缺陷的尺寸。

- 钨铜块与铬锆铜管的界面

- 1) 超声探伤: 定义 θ 如图所示。当 θ 为 $\pm 120^\circ$ 的范围内, 无超过 $\varnothing 2\text{mm}$ 当量的缺陷; 其余角度范围内, 无超过 $\varnothing 4\text{mm}$ 当量的缺陷。



- 穿管结构

- 1) 钨铜块间隙公差不大于 0.2mm ;
- 2) 外形轮廓度按图纸的轮廓度精度要求进行检测, 三坐标测量仪或测量关节臂, 表面轮廓度误差不超过 0.5mm ;

- 钨铜片

- 1) 钨铜片对正、无错位、无偏斜;
- 2) 表面平整、不允许钨料或其他杂质溢出;
- 3) 表面磨光, 表面粗糙度 $\leq \text{Ra } 0.8\mu\text{m}$;
- 4) 相邻钨铜片高低差: $\leq 0.15\text{mm}$;
- 5) 钨铜片之间的间隙均匀, 公差见图纸;

- 钨铜片/热沉界面

- 1) 每片焊合率： $\geq 95\%$ ；
- 2) 相控阵超声 C 扫描，不允许有大于 $\varnothing 2\text{mm}$ 的缺陷；
- 3) 对于 $\varnothing 1.6\text{-}\varnothing 2\text{mm}$ 缺陷，需要进行判定：
 - a) 提交不合格项报告；
 - b) 专家评议，决定是否让步接收；
- 4) 焊接强度指标
 - a) 取样：按生产批次制作样品，样品随炉或取自同一板材，铜-铜样品每批次各 1 件；
 - b) 界面的结合强度不小于无氧铜材料强度的 95%，剪切强度应大于 100MPa。

- 热沉/不锈钢界面

- 1) 如爆炸焊，结合界面为波状结构，波纹细腻均匀，波纹高度 $\leq 1\text{mm}$ ；
- 2) 超声探伤（UT）：复合界面不允许出现 $\geq \varnothing 2\text{mm}$ 的缺陷；
- 3) 焊缝强度：不低于母材（按强度小者计算）强度的 95%；
- 4) 复合板厚度均匀。

- PFU 支撑腿

- 1) 界面：单个缺陷尺寸不超过 $\varphi 2\text{mm}$ 当量的缺陷，缺陷间距大于单个缺陷的长度，缺陷面积不超过 10%；
- 2) 支撑腿与钨块之间的连接强度同工艺认证；

- 密封性能测试

- 1) 耐压测试：
 - a) 对冷却通道打水压，6.3 MPa 压力，保压 30 分钟；
 - b) 构件无明显变形，无泄漏；
- 2) 真空检漏：
 - a) 室温；
 - b) 许可漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ；
- 3) 真空环境下烘烤检漏：
 - a) 将被测试件放入真空室内，对冷却通道 4.4MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试真空漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ；
 - b) 再将被测试件加温至 240°C ，保温 2 小时。在冷却通道内通入 4.4MPa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ；

c) 降至常温后再通入 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10}$ Pa.m³/s;

d) 再将被测试件加温至 240° C，保温 2 小时。在冷却通道内通 4.4MPa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8}$ Pa.m³/s;

e) 再降至常温后再通入 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10}$ Pa.m³/s;

- 高热负荷测试

甲方对抽检 PFU 产品进行高热负荷测试。

- 1) 热负荷 15MW/m²;
- 2) 10 秒 on/ 10 秒 off;
- 3) 循环次数 5000;
- 4) 测试后表面无融化、结构无明显变形。

- 交付要求

1) 实物

a) 按要求清洗;

① 超声波清洗：在去离子水中进行长时间（4 小时）清洗，以除表面粘附物为主;

② 去离子水冲刷;

③ 真空炉烘烤：升温至 240°C，保温 2 小时;

④ 避免用手直接触摸。

b) 真空包装、存放;

2) 检验报告

a) 无损探伤报告（爆炸复合界面、钨铜片焊接界面）;

b) 几何尺寸检验报告;

c) 密封性能检测报告;

d) 清洗记录单（复合板和背板清洗、成品清洗）。

3) 质保书。质保期至少一年。

4) 甲方在乙方完成 PFU（至少一件）生产，对 PFU 开展检测，如出现不符项，则要求乙方对现有所有产品停工并开展复检。

8.4 内靶板模块技术要求

- 尺寸

- 1) PFC 表面轮廓精度：打击区 $\pm 0.25\text{mm}$ ；其他区域 $\pm 0.5\text{mm}$ ；
- 2) 其他尺寸要求参考图纸和 BEST-P31-DDD-018；

- 加工精度

部件	公差项	公差/mm	说明
PFC	轮廓度	± 0.05	与箱体连接面； PFC 加工和安装，以底部与箱体连接面为基准； 乙方需根据甲方和原型件集成方的装配需求调整配合面加工精度。
	PFU 阶差	± 0.3	相邻 PFU
	PFU 间隙	± 0.2	相邻 PFU

具体尺寸及公差要求件附件图纸，未注公差尺寸按 GB1804-F、未注形位公差按 GB/T1184-H 执行。

- 工艺过程

- 1) 供应商可按要求制定焊接工艺方案，并提供如下材料；
 - a) 加工/工艺图纸；
 - b) 加工制造、装配、检测、运输、储存所需的工装、夹具、支撑等相关设计、分析报告及图纸；
 - c) 工艺设计阶段完成后，由供应商组织并通知甲方参与评审；
- 2) 在制造和集成过程中，要分阶段分步骤的控制制造公差和安装精度。通过三坐标测量仪或测量关节臂测量；

- 焊接

- 1) 供应商需提供焊接工艺文件（焊接数据包），包括焊接图纸，WIP，WPS，WPQR；
- 2) 清洁要求
 - a) 焊接场地洁净；
 - b) 焊接过程中使用的清洗剂不可包含卤素；
 - c) PT 过程中的着色剂、显色剂等材料，在使用后需清洗干净；

- 3) 修复
- a) 同一位置允许最多两次修复；
 - b) 如需修复，供应商需提交修复的操作规程；
 - c) 修复后的焊缝无损检测需覆盖原焊缝 100% 的长度加两端各 10mm 的位置；
- 4) 根据焊接图纸，所有焊缝必须进行无损探伤。

焊缝类型	VT	打底后 PT	盖面后 PT	RT 或 UT
焊透	100%	/	100%	100%
未焊透	100%	100%	100%	/
角焊缝	100%	/	100%	/

- 5) 焊材。供应商须提供焊材的质保书。
- 6) 焊接人员需具有 ISO9606、TSGZ6002-2010 或等效标准认证（需经甲方同意），证书在有效期内；
- 7) 检测标准

检测类型	参考标准	验收等级
VT	GB/T 32259-2015	-
PT	GB/T18851.1-2012	1 级 GBT 26953-2011
UT	GB/T 29712-2013	B 级 GB 11345-2013
RT	GB/T 3323.1-2019	1 级 GB/T3323.1-2019

- 8) 无损检测人员需具有 ISO9712、GB/T 9445-2015 或等效标准认证（需经甲方同意），证书在有效期内；

- 密封性能测试

- 1) 耐压测试：
- a) 对冷却通道打水压，6.3MPa 压力，保压 30 分钟；
 - b) 构件无明显变形，无泄漏；
- 2) 真空检漏：
- a) 室温；
 - b) 许可漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ；
- 3) 真空环境下烘烤检漏：

- a) 将被测试件放入真空室内，对冷却通道 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试真空漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$;
- b) 再将被测试件加温至 240° C，保温 2 小时。在冷却通道内通入 4.4MPa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8} \text{Pa.m}^3/\text{s}$;
- c) 降至常温后再通入 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$;
- d) 再将被测试件加温至 240° C，保温 2 小时。在冷却通道内通入 4.4MPa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8} \text{Pa.m}^3/\text{s}$;
- e) 再降至常温后再通入 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$;

- 高热负荷测试

甲方对 PFC 产品进行高热负荷测试。

- 1) 热负荷 10MW/m²;
- 2) 10 秒 on/ 10 秒 off;
- 3) 循环次数 5000;
- 4) 测试后表面无熔化、结构无明显变形。

- 交付要求

1) 实物

a) 按要求清洗;

① 超声波清洗：在去离子水中进行长时间（4 小时）清洗，以除表面粘附物为主;

② 去离子水冲刷;

③ 真空炉烘烤：升温至 240℃，保温 2 小时;

④ 避免用手直接触摸。

b) 真空包装、存放;

2) 出厂检验报告

a) 无损探伤报告（爆炸复合界面、钨铜片焊接界面）;

b) 几何尺寸检验报告;

c) 密封性能检测报告;

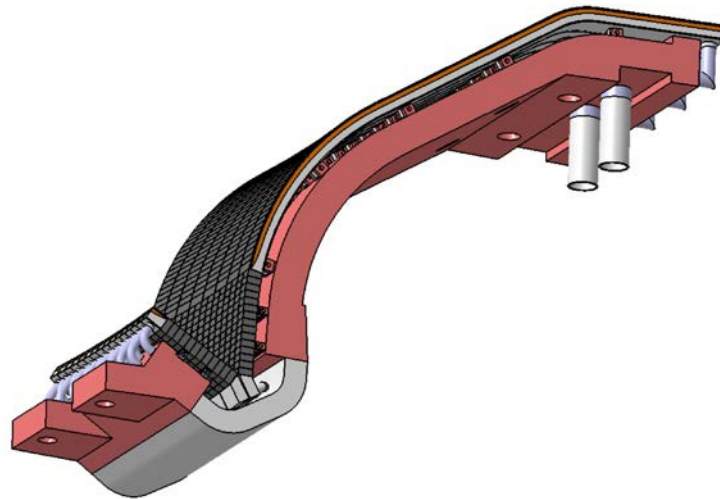
d) 清洗记录单（复合板和背板清洗、成品清洗）。

- 3) 质保书。质保期至少一年。
- 4) 到货检查
 - a) 目视
 - b) 尺寸检测
 - c) 常温漏率检测

到货检查由甲方执行，如到货检查出现不符项，乙方应提供响应解决措施。

9. 外靶板

外靶板包括外垂直靶板、外返流板的 PFU 平板、穿管结合结构，以及外靶板过渡支撑结构。



外靶板示意图

平板结构和穿管结构可采用热等静压、爆炸焊、钎焊等工艺方案一种或多种组合，方案需经甲方批准。平板与穿管结构通过 Inconel 625 过渡管焊接连接，如供应商采用不同方案，须经甲方批准。

9.1 采购范围

原型件的外靶板 PFC 部件包括一个完整偏滤器外靶板模块，零部件数量如下。

项目	结构	数量
外垂直靶板 PFU	平板×8+穿管×16	8
外水平靶板 PFU	穿管	16
过渡支撑	不锈钢焊接	1

外靶板模块集成	N/A	1
---------	-----	---

9.2 材料

主要原材料如下表。其中，钨铜片为成品采购，可由甲方统一采购或制定供应商。

材料	采购标准
钨	BEST-P31-TS-003
无氧铜	BEST-P31-TS-007
钨/铜片	- 整体尺寸误差不超过±0.05mm; - 无氧铜层厚度误差不超过±0.1mm; - 表面粗糙度小于 Ra 0.8μm; - 结合面当量缺陷不超过 2mm
铬锆铜板	核聚变装置用铬锆铜板材 Q/DLZ 01—2011
铬锆铜管	BEST-P31-TS-002
316L 钢板	BEST-P31-TS-001
316L	GB 20801-2020 压力管道-工业管道
XM-19	BEST-P31-TS-004
Inconel 625	BEST-P31-TS-005
Inconel 718	BEST-P31-TS-007
焊料	焊丝、焊材提供质保证书，包含元素含量

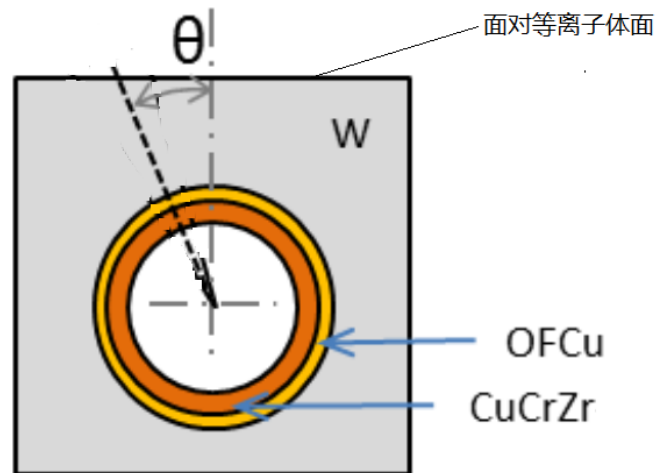
9.3 PFU 技术要求

- 钨铜块 (monoblock)
 - 1) 表面平整、光洁，无溢出物；
 - 2) 当量缺陷尺寸不允许超过 Ø2mm；
 - 3) 对于 Ø1.6-Ø2mm 缺陷，需要进行判定：
 - a) 提交不合格项报告；
 - b) 专家评议，决定是否让步接收；
 - 4) 总的缺陷面积不超过连接面积的 5%；

5) 不允许低于以上标准的两个或以上的缺陷存在，除非两个缺陷之间的距离大于最大的缺陷的尺寸。

- 钨铜块与铬锆铜管的界面

1) 超声探伤：定义 θ 如图所示。当 θ 为 $\pm 120^\circ$ 的范围内，无超过 $\phi 2\text{mm}$ 当量的缺陷；其余角度范围内，无超过 $\phi 4\text{mm}$ 当量的缺陷。



- 穿管结构

- 1) 钨铜块间隙公差不大于 0.2mm ;
- 2) 外形轮廓度按图纸的轮廓度精度要求进行检测，三坐标测量仪或测量关节臂，表面轮廓度误差不超过 0.5mm ;

- 钨铜片

- 6) 钨铜片对正、无错位、无偏斜;
- 7) 表面平整、不允许钨料或其他杂质溢出;
- 8) 表面磨光，表面粗糙度 $\leq \text{Ra } 0.8\mu\text{m}$;
- 9) 相邻钨铜片高低差： $\leq 0.15\text{mm}$;
- 10) 钨铜片之间的间隙均匀，公差见图纸;

- 钨铜片/热沉界面

- 1) 每片焊合率： $\geq 95\%$;
- 2) 相控阵超声 C 扫描，不允许有大于 $\phi 2\text{mm}$ 的缺陷;
- 3) 对于 $\phi 1.6\text{-}\phi 2\text{mm}$ 缺陷，需要进行判定：
 - a) 提交不合格项报告;
 - b) 专家评议，决定是否让步接收;

4) 焊接强度指标

a) 取样：按生产批次制作样品，样品随炉或取自同一板材，铜-铜样品每批次各 1 件；

b) 界面的结合强度不小于无氧铜材料强度的 95%，剪切强度应大于 100MPa。

- 热沉/不锈钢界面

1) 如爆炸焊，结合界面为波状结构，波纹细腻均匀，波纹高度 $\leq 1\text{mm}$ ；

2) 超声探伤 (UT)：复合界面不允许出现 $\geq \text{Ø}2\text{mm}$ 的缺陷；

3) 焊缝强度：不低于母材（按强度小者计算）强度的 95%；

4) 复合板厚度均匀。

- PFU 支撑腿

1) 界面：单个缺陷尺寸不超过 $\phi 2\text{mm}$ 当量的缺陷，缺陷间距大于单个缺陷的长度，缺陷面积不超过 10%；

2) 支撑腿与钨块之间的连接强度同工艺认证；

- 密封性能测试

1) 耐压测试：

a) 对冷却通道打水压，6.3 MPa 压力，保压 30 分钟；

b) 构件无明显变形，无泄漏；

2) 真空检漏：

a) 室温；

b) 许可漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；

3) 真空环境下烘烤检漏：

a) 将被测试件放入真空室内，对冷却通道 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试真空漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；

b) 再将被测试件加温至 240°C ，保温 2 小时。在冷却通道内通入 4.4MPa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；

c) 降至常温后再通入 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；

d) 再将被测试件加温至 240°C ，保温 2 小时。在冷却通道内通 4.4MPa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；

e) 再降至常温后再通入 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$;

- **高热负荷测试**

甲方对抽检 PFU 产品进行高热负荷测试。

- 1) 热负荷 15MW/m²;
- 2) 10 秒 on/ 10 秒 off;
- 3) 循环次数 5000;
- 4) 测试后表面无融化、结构无明显变形。

- **交付要求**

1) 实物

a) 按要求清洗;

① 超声波清洗：在去离子水中进行长时间（4小时）清洗，以除表面粘附物为主;

② 去离子水冲刷;

③ 真空炉烘烤：升温至 240℃，保温 2 小时;

④ 避免用手直接触摸。

b) 真空包装、存放;

2) 检验报告

a) 无损探伤报告（爆炸复合界面、钨铜片焊接界面）;

b) 几何尺寸检验报告;

c) 密封性能检测报告;

d) 清洗记录单（复合板和背板清洗、成品清洗）。

3) 质保书。质保期至少一年。

4) 甲方在乙方完成 PFU（至少一件）生产，对 PFU 开展检测，如出现不符项，则要求乙方对现有所有产品停工并开展复检。

9.4 外靶板模块技术要求

- **尺寸**

- 1) PFC 表面轮廓精度：打击区 $\pm 0.25\text{mm}$ ；其他区域 $\pm 0.5\text{mm}$;
- 2) 其他尺寸要求参考图纸和 BEST-P31-DDD-018;

- **加工精度**

部件	公差项	公差/mm	说明
PFC	轮廓度	±0.05	与箱体连接面； PFC 加工和安装，以底部与箱体连接面为基准； 乙方需根据甲方和原型件集成方的装配需求调整配合面加工精度。
	PFU 阶差	±0.3	相邻 PFU
	PFU 间隙	±0.2	相邻 PFU

具体尺寸及公差要求件附件图纸，未注公差尺寸按 **GB1804-F**、未注形位公差按 **GB/T1184-H** 执行。

- 工艺过程

- 3) 供应商可按要求制定焊接工艺方案，并提供如下材料；
 - d) 加工/工艺图纸；
 - e) 加工制造、装配、检测、运输、储存所需的工装、夹具、支撑等相关设计、分析报告及图纸；
 - f) 工艺设计阶段完成后，由供应商组织并通知甲方参与评审；
- 4) 在制造和集成过程中，要分阶段分步骤的控制制造公差和安装精度。通过三坐标测量仪或测量关节臂测量；

- 焊接

- 9) 供应商需提供焊接工艺文件（焊接数据包），包括焊接图纸，WIP，WPS，WPQR；
- 10) 清洁要求
 - d) 焊接场地洁净；
 - e) 焊接过程中使用的清洗剂不可包含卤素；
 - f) PT 过程中的着色剂、显色剂等材料，在使用后需清洗干净；
- 11) 修复
 - d) 同一位置允许最多两次修复；
 - e) 如需修复，供应商需提交修复的操作规程；
 - f) 修复后的焊缝无损检测需覆盖原焊缝 100% 的长度加两端各 10mm 的位置；

12) 根据焊接图纸，所有焊缝必须进行无损探伤。

焊缝类型	VT	打底后 PT	盖面后 PT	RT 或 UT
焊透	100%	/	100%	100%
未焊透	100%	100%	100%	/
角焊缝	100%	/	100%	/

13) 焊材。供应商须提供焊材的质保书。

14) 焊接人员需具有 ISO9606、TSGZ6002-2010 或等效标准认证（需经甲方同意），证书在有效期内；

15) 检测标准

检测类型	参考标准	验收等级
VT	GB/T 32259-2015	-
PT	GB/T18851.1-2012	1 级 GB/T 26953-2011
UT	GB/T 29712-2013	B 级 GB 11345-2013
RT	GB/T 3323.1-2019	1 级 GB/T3323.1-2019

16) 无损检测人员需具有 ISO9712、GB/T 9445-2015 或等效标准认证（需经甲方同意），证书在有效期内；

- 密封性能测试

1) 耐压测试：

- a) 对冷却通道打水压，6.3MPa 压力，保压 30 分钟；
- b) 构件无明显变形，无泄漏；

2) 真空检漏：

- a) 室温；
- b) 许可漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；

3) 真空环境下烘烤检漏：

- f) 将被测试件放入真空室内，对冷却通道 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试真空漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；
- g) 再将被测试件加温至 240° C，保温 2 小时。在冷却通道内通入 4.4MPa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；

- h) 降至常温后再通入 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10}$ Pa.m³/s;
- i) 再将被测试件加温至 240° C，保温 2 小时。在冷却通道内通入 4.4MPa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8}$ Pa.m³/s;
- j) 再降至常温后再通入 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10}$ Pa.m³/s;

- 高热负荷测试

甲方对 PFC 产品进行高热负荷测试。

- 1) 热负荷 10MW/m²;
- 2) 10 秒 on/ 10 秒 off;
- 3) 循环次数 5000;
- 4) 测试后表面无融化、结构无明显变形。

- 交付要求

1) 实物

a) 按要求清洗;

① 超声波清洗：在去离子水中进行长时间（4小时）清洗，以除表面粘附物为主;

② 去离子水冲刷;

③ 真空炉烘烤：升温至 240℃，保温 2 小时;

④ 避免用手直接触摸。

b) 真空包装、存放;

2) 出厂检验报告

a) 无损探伤报告（爆炸复合界面、钨铜片焊接界面）;

b) 几何尺寸检验报告;

c) 密封性能检测报告;

d) 清洗记录单（复合板和背板清洗、成品清洗）。

3) 质保书。质保期至少一年。

4) 到货检查

a) 目视

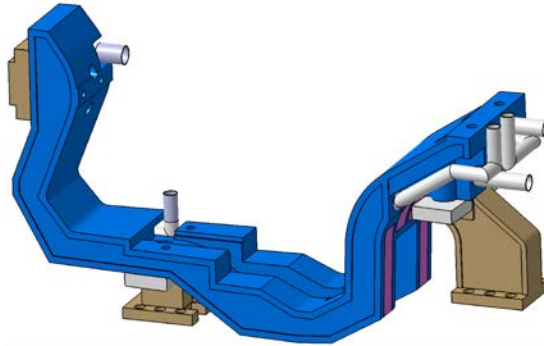
b) 尺寸检测

c) 常温漏率检测

到货检查由甲方执行，如到货检查出现不符项，乙方应提供响应解决措施。

10. 支撑箱体

支撑箱体为不锈钢加工和焊接，包括箱体和支撑结构。



支撑箱体示意图

10.1 采购范围

支撑箱体加工集成包括箱体和支撑结构，具体数量如下。

部件	结构	数量
箱体	焊接	1
支撑结构	焊接	3

10.2 材料

模块生产中包括的主要原材料如下表。

材料	采购标准
316L 钢板	BEST-P31-TS-001

10.3 技术要求

- 尺寸

支撑箱体尺寸要求参考图纸和 BEST-P31-DDD-018;

- 加工精度

部件	公差项	公差/mm	说明
箱体	尺寸	±0.25	与 PFC 和支撑连接面

	轮廓度	±0.2	
	位置度	±0.15	安装孔

具体尺寸及公差要求件附件图纸，未注公差尺寸按 GB1804-F、未注形位公差按 GB/T1184-H 执行。

- 工艺过程

- 5) 供应商可按要求制定焊接工艺方案，并提供如下材料；
 - g) 加工/工艺图纸；
 - h) 加工制造、装配、检测、运输、储存所需的工装、夹具、支撑等相关设计、分析报告及图纸；
 - i) 工艺设计阶段完成后，由供应商组织并通知甲方参与评审；
- 6) 在制造和集成过程中，要分阶段分步骤的控制制造公差和安装精度。通过三坐标测量仪或测量关节臂测量；

- 焊接

- 1) 供应商需提供焊接工艺文件，包括焊接图纸，WIP，WPS，WPQR；
- 2) 清洁要求
 - g) 焊接场地洁净；
 - h) 焊接过程中使用的清洗剂不可包含卤素；
 - i) PT 过程中的着色剂、显色剂等材料，在使用后需清洗干净；
- 3) 修复
 - g) 同一位置允许最多两次修复；
 - h) 如需修复，供应商需提交修复的操作规程；
 - i) 修复后的焊缝无损检测需覆盖原焊缝 100% 的长度加两端各 10mm 的位置；
- 4) 根据焊接图纸，所有焊缝必须进行无损探伤。

焊缝类型	VT	打底后 PT	盖面后 PT	RT 或 UT
焊透	100%	/	100%	100%
未焊透	100%	100%	100%	/
角焊缝	100%	/	100%	/

- 5) 焊材。供应商须提供焊材的质保书。

6) 焊接人员需具有 ISO9606、TSGZ6002-2010 或等效标准认证（需经甲方同意），证书在有效期内；

7) 检测标准

检测类型	参考标准	验收等级
VT	GB/T 32259-2015	-
PT	GB/T18851.1-2012	1 级 GBT 26953-2011
UT	GB/T 29712-2013	B 级 GB 11345-2013
RT	GB/T 3323.1-2019	1 级 GB/T3323.1-2019

8) 无损检测人员需具有 ISO9712、GB/T 9445-2015 或等效标准认证（需经甲方同意），证书在有效期内；

- 密封性能测试

1) 耐压测试：

- a) 对冷却通道打水压，6.3MPa 压力，保压 30 分钟；
- b) 构件无明显变形，无泄漏；

2) 真空检漏：

- a) 室温；
- b) 许可漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；

3) 真空环境下烘烤检漏：

- k) 将被测试件放入真空室内，对冷却通道 6.3Mpa 的氦气，保压 30 分钟，测试真空漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；
- l) 再将被测试件加热至 240° C，保温 2 小时。在冷却通道内通入 4.4Mpa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；
- m) 降至常温后再通入 6.3Mpa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；
- n) 再将被测试件加热至 240° C，保温 2 小时。在冷却通道内通入 4.4Mpa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；
- o) 再降至常温后再通入 6.3Mpa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；

- 交付要求

1) 实物

a) 按要求清洗；

① 超声波清洗：在去离子水中进行长时间（4小时）清洗，以除表面粘附物为主；

② 去离子水冲刷；

③ 真空炉烘烤：升温至 240℃，保温 2 小时；

④ 避免用手直接触摸。

b) 真空或保护性气体密封包装；面向等离子体面需单独保护，避免机械损伤及氧化；开放管应密封。

2) 出厂检验报告

a) 无损探伤报告（爆炸复合界面、钨铜片焊接界面）；

b) 几何尺寸检验报告；

c) 密封性能检测报告；

d) 清洗记录单（复合板和背板清洗、成品清洗）。

3) 质保书。质保期至少一年。

4) 到货检查

a) 目视

b) 尺寸检测

c) 常温漏率检测

到货检查由甲方执行，如到货检查出现不符项，乙方应提供响应解决措施。

11. 偏滤器原型件整体集成

原型件整体集成包括内靶板、外靶板和支撑盒体的装配和焊接、加工。

11.1 采购范围

原型件的模块集成包括一个完整偏滤器模块，具体数量如下。外靶板、内靶板和支撑盒体作为完整部件提供给整体集成方。集成方需根据原型件验收标准，评估并对内靶板、外靶板和盒体相关配合界面提出需求。

部件	结构	数量
整体集成	N/A	1

11.2 材料

模块生产中包括的主要原材料如下表。

材料	采购标准
316L 钢板	BEST-P31-TS-001

11.3 技术要求

- 尺寸

- 1) PFC 表面轮廓公差：打击区 $\pm 0.35\text{mm}$ ；其他区域 $\pm 1\text{mm}$ ；
- 2) 其他尺寸要求参考图纸和 BEST-P31-DDD-018；

- 加工精度

整体集成方应向内靶板、外靶板和支撑盒体部件的接口精度提出输入需求。

具体尺寸及公差要求件附件图纸，未注公差尺寸按 GB1804-F、未注形位公差按 GB/T1184-H 执行。

- 工艺过程

- 7) 供应商可按要求制定焊接工艺方案，并提供如下材料；
 - j) 加工/工艺图纸；
 - k) 加工制造、装配、检测、运输、储存所需的工装、夹具、支撑等相关设计、分析报告及图纸；
 - l) 工艺设计阶段完成后，由供应商组织并通知甲方参与评审；
- 8) 在制造和集成过程中，要分阶段分步骤的控制制造公差和安装精度。通过三坐标测量仪或测量关节臂测量；

- 焊接

- 1) 供应商需提供焊接工艺文件，包括焊接图纸，WIP，WPS，WPQR；
- 2) 清洁要求
 - j) 焊接场地洁净；
 - k) 焊接过程中使用的清洗剂不可包含卤素；
 - l) PT 过程中的着色剂、显色剂等材料，在使用后需清洗干净；
- 3) 修复
 - j) 同一位置允许最多两次修复；

- k) 如需修复，供应商需提交修复的操作规程；
- l) 修复后的焊缝无损检测需覆盖原焊缝 100% 的长度加两端各 10mm 的位置；
- 4) 根据焊接图纸，所有焊缝必须进行无损探伤。

焊缝类型	VT	打底后 PT	盖面后 PT	RT 或 UT
焊透	100%	/	100%	100%
未焊透	100%	100%	100%	/
角焊缝	100%	/	100%	/

- 5) 焊材。供应商须提供焊材的质保书。
- 6) 焊接人员需具有 ISO9606、TSGZ6002-2010 认证资格，或等效标准认证（需经甲方同意），证书在有效期内；
- 7) 检测标准

检测类型	参考标准	验收等级
VT	GB/T 32259-2015	-
PT	GB/T18851.1-2012	1 级 GBT 26953-2011
UT	GB/T 29712-2013	B 级 GB 11345-2013
RT	GB/T 3323.1-2019	1 级 GB/T3323.1-2019

- 8) 无损检测人员需具有 ISO9712、GB/T 9445-2015 认证资格，或等效标准认证（需经甲方同意），证书在有效期内；

- 密封性能测试

1) 耐压测试：

- a) 对冷却通道打水压，6.3MPa 压力，保压 30 分钟；
- b) 构件无明显变形，无泄漏；

2) 真空检漏：

- a) 室温；
- b) 许可漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；

3) 真空环境下烘烤检漏：

- p) 将被测试件放入真空室内，对冷却通道 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试真空漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$ ；

- q) 再将被测试件加热至 240° C，保温 2 小时。在冷却通道内通入 4.4MPa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8} \text{Pa.m}^3/\text{s}$;
- r) 降至常温后再通入 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$;
- s) 再将被测试件加热至 240° C，保温 2 小时。在冷却通道内通入 4.4MPa 氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-8} \text{Pa.m}^3/\text{s}$;
- t) 再降至常温后再通入 6.3MPa 的氦气，保压 30 分钟，测试漏率，漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa.m}^3/\text{s}$;

- 交付要求

1) 实物

a) 按要求清洗;

① 超声波清洗：在去离子水中进行长时间（4 小时）清洗，以除表面粘附物为主;

② 去离子水冲刷;

③ 真空炉烘烤：升温至 240°C，保温 2 小时;

④ 避免用手直接触摸。

b) 真空或保护性气体密封包装；面向等离子体面需单独保护，避免机械损伤及氧化；开放管应密封。

2) 出厂检验报告

a) 无损探伤报告（爆炸复合界面、钨铜片焊接界面）;

b) 几何尺寸检验报告;

c) 密封性能检测报告;

d) 清洗记录单（复合板和背板清洗、成品清洗）。

3) 质保书。质保期至少一年。

4) 到货检查

a) 目视

b) 尺寸检测

c) 常温漏率检测

到货检查由甲方执行，如到货检查出现不符项，乙方应提供响应解决措施。

12. 进度节点及交付物

项目进度过程中的主要控制点如下，具体内容将在 MIP 中体现。

节点	控制点	交付物	时间 (T0 为中 标时间)
进度计划	HP、R	进度计划	T0+0.5 个月
MIP	HP、R	MIP、QP	T0+1 个月
工艺认证	HP、W、R	<ol style="list-style-type: none"> 1. CuCrZr 材料测试报告; 2. CuCrZr/316L 测试报告 3. PFU 支撑腿测试报告 4. CuCrZr / 316L 管-管对接测试报告 	T0+2 个月
材料报告	R、S2	<ol style="list-style-type: none"> 1. 钨铜块检测报告 2. 钨铜片检测报告 3. 原材料质保证书 4. 焊材质保证书 	T0+2 个月
MRR 评审	HP	<ol style="list-style-type: none"> 1. 原材料质保书 2. 加工图纸 3. 焊接数据包 4. 工艺方案 	T0+2 个月
PFU 验收	W、R、 S2(20%)	<ol style="list-style-type: none"> 1. PFU 尺寸检测报告 2. PFU 无损检测报告 3. PFU 压力测试报告 4. PFU 漏率测试报告 5. PFU 烘烤检漏报告 6. PFU 高热负荷测试 	T0+4 个月
PFC 验收	W、R、S1	<ol style="list-style-type: none"> 1. 焊接文件包 2. 装配工艺方案 3. PFC 尺寸检测报告 4. PFC 无损检测报告 	T0+5 个月

		5. PFC 压力测试报告 6. PFC 漏率测试报告 7. PFC 烘烤检漏报告	
支撑盒体验收	W、R、S1	1. 焊接文件包 2. 支撑箱体尺寸检测报告 3. 支撑箱体无损检测报告 4. 支撑箱体压力测试报告 5. 支撑箱体漏率测试报告 6. 支撑箱体烘烤检漏报告	T0+5 个月
原型件整体验收	W、R、S1	1. 焊接文件包 2. 装配工艺方案 3. 原型件尺寸检测报告 4. 原型件无损检测报告 5. 原型件压力测试报告 6. 原型件漏率测试报告 7. 原型件烘烤检漏报告	T0+6 个月

控制点说明：控制点为甲方对制造流程监控点，在监控点由乙方提供必要产品、文件、报告等，待甲方批准后，乙方可进入后续制造流程。

HP: Hold point(停工待检点)

W: Witness of Operation(见证点)

NP: Notification Point (知会点)

S1: 100% inspection(全检)

S2 Random inspection(抽检)

R: Review (报告审核)

13. 质量保证

1) 乙方应在 ISO9001 或 ISO13485 质量保证体系下实施该项目，并确保质量管理体系有效运行。

2) 乙方应制定完备的加工和检测计划并保证制造过程严格按经甲方批准的计划实施所有加工、装配、检测、测试等活动。并按照计划中的规定及时知会甲方参与质量监测过程。

3) 乙方应妥善保存和管理好项目实施过程中的各类文件和记录，对于生产、检测、测试的相关文件和记录要及时编/填写，归档，整理以备检查和追溯。记录应完整，可靠。

4) 乙方单独采购的原材料（经甲方允许）应按照图纸规定使用并符合合同中的相关规定。原材料应做好标识，并妥善保管质保书或检测报告确保可追溯。

5) 乙方应做好定期的设备维护和工具的检定、标识，并做好记录。

6) 乙方应确保有与生产的杜瓦部件相适应的生产场地、环境条件、生产设备以及专业技术人员；生产岗位操作人员应当具有相应的理论知识和实际操作技能并按照要求安排相关资质人员从事加工、检测、测试活动，并对人员的操作水平做定期的检查和培训。

7) 所有生产、检测过程中发现的不符合项目应及时以记录、报告的形式通知甲方，提出解决问题的方案与甲方进行协商解决。

8) 乙方应在项目实施过程中分析体系中出现的问题，并不断改善。

9) 乙方应对所有零部件进行编号，确保零部件的可追溯性。

14. 文件要求

1) 设计图纸、工艺验证和确认记录、测试报告；

2) 原材料质保书；

3) 加工/组装图纸；组装、测试、装卸、运输所需的夹具、固定支撑和一些特定工装的制造图纸；

4) 夹具、固定支撑和工装的结构分析报告。

5) 加工制造阶段总体时间进度计划；

6) 质量计划(QP)和制造检验测试计划(MIP)；

7) 获得甲方认可的制造、检验和测试的相关文档；

8) 制造各阶段所需的所有材料、焊接耗材和标准零部件的清单；

9) 出厂测试报告。

注：进度计划、质量计划和制造检验测试计划在开工前提交并获得甲方认可。

10) 测试报告、作业指导书、包装存储方案。