编　　号 _____

密　　级 _____

阶段标记 _____

页　　数 _____

名称：高能宇宙辐射探测设施（HERD）量能器硅电荷探测器塑闪探测器和顶面硅迳迹仪初步热控设计报告

会

单位　中国科学院高能物理研究所

编写

校对

审核

标审

批准

中国科学院高能物理研究所空间项目办

修订记录

序号	章节名称	修订内容简述	修订日期	修订前版本号	修订后版本号	修订人	复核人
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							

目　　录

1. HERD 探测器整体说明 14
1.1. HERD 探测器总体设计 14
1.2. HERD 探测器质量与尺寸 15
1.3. HERD 探测器配套 15
1.4. HERD 探测器坐标系 16
2. HERD 探测器热仿真初步要求 17
3. 硅电荷探测器热控设计 18
3.1. 任务需求和设计约束 18
3.1.1. 热控功能和指标需求 18
3.1.2. 外部热控界面约束 18
3.1.3. 全任务剖面热控内容 19
3.2. SCD 构型设计 20
3.3. 热控方案设计 23
3.3.1. 热控方案概述 23
3.3.2. 功耗分布 26
3.3.3. 散热设计 28
3.3.4. 隔热设计 33
3.3.5. 测温设计 34
3.3.6. 保温设计 34
3.4. SCD 结构材料补充说明 35
4. 塑闪探测器热控设计 38
4.1. 任务需求和设计约束 38
4.1.1. 塑闪探测器单机热控功能和指标需求 38
4.1.2. PSD 单机外部热控界面约束 41
4.1.3. PSD 单机全任务剖面热控内容 42
4.2. 构型与布局 43
4.2.1. 蜂窝板 47
4.2.2. 套筒 48
4.2.3. 热管安装支架 51

4.3. 热控方案设计 52
4.3.1. 热控方案概述 52
4.3.2. 散热设计 54
4.3.3. 隔热设计 61
4.3.4. 保温设计 62
4.4. PSD 结构材料补充说明 62
5. STK 热控设计 64
5.1. 任务需求和设计约束 64
5.1.1. STK 单机外部热环境设计约束 64
5.1.2. STK 单机热控界面设计约束 64
5.1.3. STK 单机全任务剖面热控设计输入 66
5.1.4. STK 单机热控功能及指标要求 66
5.2. STK 热设计方案 67
5.2.1. 结构材料 67
5.2.2. STK 单机重量及包络尺寸 68
5.2.3. STK 功耗分布 69
5.2.4. 蜂窝板导热及隔热设计 70
5.2.5. 蜂窝板胶接 ladder 导热设计 71
5.2.6. Ladder 胶接设计 73
5.2.7. 蜂窝板胶接 ladder 设计 74
5.2.8. Ladder 导热设计 75
5.2.9. Ladder 前端电子学导热路径说明 76
5.2.10. TRB 热设计 77
5.2.11. 保温设计 82
5.3. STK 结构材料补充说明 83
6. 量能器热设计 85
6.1. 任务需求和设计约束 85
6.1.1. 量能器单机外部热环境设计约束 85
6.1.2. 量能器单机热控界面设计约束 85
6.1.3. 量能器工作模式 87
6.1.4. 量能器单机全任务剖面热控设计输入 88

6.1.5. 量能器单机热控功能及指标要求 88
6.2. 任务分析 89
6.3. 量能器热设计方案 89
6.3.1. CALO 结构组成 89
6.3.2. 量能器质量分布及单机尺寸 91
6.3.3. 量能器功耗分布 93
6.3.4. 单层晶体组件导热及隔热设计 96
6.3.5. 相机和触发冷板设计 97
6.3.6. 底部后端电子学机箱导热设计 98
6.3.7. 量能器导热路径说明 99
6.3.8. 保温设计 100
6.3.9. 测温设计 101
6.4. 量能器结构材料补充说明 101

图　目　录

图 1-1　HERD 探测器安装位置示意图 14
图 1-2　HERD 探测器组成爆炸示意图 15
图 1-3　HERD 探测器坐标定义图 17
图 2-1 SCD 子系统外部热控界面图 19
图 2-2 SCD 子系统在 HERD 的位置示意图 20
图 2-3 SCD 子系统结构爆炸图 21
图 2-4 硅微条探测器总体分布示意图 22
图 2-5 探测器与蜂窝板胶接后示意图 22
图 2-6 Super-Ladder 爆炸图 23
图 2-7　2in1- FEH 示意图 23
图 2-8　SCD 子系统尺寸图 25
图 2-9　一个前端模块（4 个 SFE 板和 1 个 L0 板）的功耗分布图 27
图 2-10 一大层顶面和侧面 SCD 的前端 功耗 28
图 2-11 ASIC 电子学导热路径图 29
图 2-12 ladder 胶接前端电子学和硅片涂胶示意图 29
图 2-13 ladder 胶接硅片固化后涂胶痕迹图 30
图 2-14　SCD-ASIC 电子学冷板和热管安装位置示意图 30
图 2-15　导热索导热设计示意图 31
图 2-16 SCD 导热索示意图 32
图 2-17　PSbox 机箱内高功耗元器件与结构安装示意图 33
图 2-18　多层总体布局示意图 35
图 2-19　顶面 SCD 外侧多层布置情况 35
图 2-20　侧面 SCD 外侧多层布置情况 35
图 2-21　顶面 PSD&SCD 爆炸图 36
图 2-22　侧面 PSD&SCD 爆炸图 36
图 2-23　SCD 蜂窝板探测器组件示意图 37
图 2-24　SCD-Ladder 导热路径 37
图 2-25　蜂窝板结构示意图 38
图 2-26　PSbox 安装示意图 38

图 3-1　SiPM 辐照前后的暗噪声随阈值的频率变化 40
图 3-2　不同的 SiPM 暗噪声过阈计数率下，造成的误 veto 概率随温度的变化 41
图 3-3　PSD 子系统外部热控配置图 42
图 3-4 PSD 子系统在 HERD 的位置示意图 43
图 3-5 PSD 子系统结构爆炸图 44
图 3-6 塑闪探测单元示意图 45
图 3-7 塑闪分组示意图 45
图 3-8 顶面塑闪阵列 46
图 3-9 侧面塑闪阵列 47
图 3-10 PSD 顶面蜂窝板爆炸图 48
图 3-11 套筒隔热垫示意图 48
图 3-12 PSD 塑闪套筒示意图 50
图 3-13 PSD-SiPM 读出组件、导热索与套筒螺接示意图 50
图 3-14 套筒尺寸设计的安全余量 51
图 3-15 热管安装支架示意图 51
图 3-16　PSD 安装细节关系示意图 52
图 3-17　SiPM 电子学功耗分布 54
图 3-18　SiPM 电子学导热路径图 55
图 3-19　辐冷板与热管网络示意图 56
图 3-20　SiPM 读出组件合并示意图 57
图 3-21　前端 SiPM 读出组件爆炸图 57
图 3-22　前端 SiPM 读出组件剖视图 57
图 3-23　热管与 SiPM 读出电子学之间的导热索位置示意图 58
图 3-24　PSD 导热索示意图 58
图 3-25　PSD 热管分布图 60
图 3-26　PSbox 机箱内元器件的散热路径图 61
图 3-27　PSbox 机箱内高功耗元器件与结构安装示意图 61
图 3-28　PSD 热耗分布示意图 62
图 3-29　蜂窝板结构示意图 63
图 3-30　PSD 导热索局部示意图 63

图 3-31　套筒示意图.....64
图 4-1　STK 单机外部热控配置图.....65
图 4-2　STK 单机流体回路支路进出口设计示意图..... 65
图 4-3　STK 单机 TRB 流体盘管设计示意图.....66
图 4-4　STK 单机尺寸图（未含多层）.....69
图 4-5　STK 单机总体热控示意图.....70
图 4-6　STK 单机单层蜂窝板紫铜角件设计示意图..... 71
图 4-7　STK 单机 8 层层蜂窝板整体加工说明图.....71
图 4-8　STK 单机蜂窝板导热设计示意图.....72
图 4-9　ladder 胶接前端电子学和探测器涂胶示意图.....73
图 4-10　STK 载荷 ladder 导热设计局部视图.....73
图 4-11　ladder 组成爆炸图.....74
图 4-12　ladder 胶接 Si 探测器固化后涂胶痕迹图.....74
图 4-13　STK 单层蜂窝板探测器导热设计示意图.....75
图 4-14　STK 单层蜂窝板探测器热管导热设计示意图..... 76
图 4-15　STK 单机前端电子学导热路径图.....77
图 4-16　STK 单机 TRB 侧面隔热安装凸台和多层设计示意图..... 78
图 4-17　STK 单机 TRB 框架侧面实施多层示意图.....79
图 4-18　STK 单机 TRB 机箱导热路径图.....79
图 4-19　STK 单机 TRB 电子学 DCDC 安装和框架导热设计示意图.... 81
图 4-20　STK 单机 TRB 器件导热设计示意图.....81
图 4-21　STK 单机 TRB 器件导热路径图.....82
图 4-22　STK 单机整机结构材料说明图.....83
图 4-23　STK 探测器蜂窝板组件结构材料说明图.....83
图 4-24　STK 通用/钨板和底蜂窝板结构材料说明图..... 84
图 4-25　STK 顶蜂窝板结构材料说明图.....84
图 4-26　STK TRB 电箱结构材料说明图.....85
图 5-1　量能器单机外部热控配置图..... 86
图 5-2　量能器单机流体回路支路进出口设计示意图.....86
图 5-3 量能器工作模式及热耗示意图..... 88
图 5.3- 1 量能器三视图.....91

图 5-5　量能器单机总体热控示意图 94
图 5-6 后端电子学主备布局示意图 94
图 5-7 量能器单层编号及坐标示意图 96
图 5-8 量能器热耗分布示意图 96
图 5-9 量能器单机晶体模块设计示意图 96
图 5-10　量能器单机 23 层碳纤维栅格和导流板整体加工说明图 97
图 5-11　触发微孔板组件（左）；相机微孔板组件（右） 98
图 5-12 量能器底部布局示意图 99
图 5-13　量能器单机底部电子学机箱器件导热设计示意图 99
图 5-14　量能器单机电子学导热路径图 100
图 5-15　量能器单层组件结构说明图 1 101
图 5-16　量能器单层组件结构说明图 2 102
图 5-17　量能器整体结构材料说明图 1 103
图 5-18　量能器整体结构材料说明图 2 104

表　目　录

表 1-1　HERD 总体结构技术指标及设计结果汇总表 15
表 1-2　HERD 硬件产品配套表 16
表 2-1　SCD 子系统功耗分布及温控需求 18
表 2-2 任务坡面与热控工作内容 19
表 2-3　SCD 部组件表热特性表 24
表 2-4　SCD 子系统质量分布表 25
表 3-1 PSD 功耗分布及温控要求 41
表 3-2　PSD 子系统全任务剖面热控工作模式描述 42
表 3-3　PSD 部组件热物特性表 52
表 3-4　PSD 载荷子系统蜂窝板质量统计 53
表 4-1　STK 单机全任务剖面热控工作模式描述 66
表 4-2　STK 功耗分布及温控要求 67
表 5-1　量能器单机全任务剖面热控工作模式描述 88
表 5-2　量能器功耗分布及温控要求 88
表 5.3- 1　量能器质量汇总表 91
表 5-4 满配模式下每层 PD 前端电子学功耗分布 95
表 5-5 低功耗模式下每层 PD 前端电子学功耗分布 95
表 5-6　量能器单机电子学导热路径界面设计说明 100

1. HERD 探测器整体说明

1.1. HERD 探测器总体设计

HERD 探测器随全开放货船发射，全开放货船与空间站本体对接完成后，由空间站大机械臂抓取 HERD 探测器转运至多功能舱第 III 象限预定挂点。通过对接机构完成 HERD 探测器到位安装和机、电、液连接，载荷指向天顶，随空间站飞行展开长期巡天观测。HERD 探测器安装位置如下图所示。



图 1-1　HERD 探测器安装位置示意图

HERD 探测器组成如下图所示，分为上部探测器部分和下部设备箱部分。探测器部分以量能器为中心整体呈现为“洋葱”式结构，从内而外包含三维成像量能器(CALO)、硅径迹仪(STK)、塑闪探测器(PSD)、硅电荷探测器(SCD)和穿越辐射探测器(TRD)等五种仪器。下部设备箱部分包括 3 台增强相机、1 台触发探测器、2 台 KPS 电控箱、1 台配电箱、1 台热控电箱和热控组件、主结构、2 台星敏、2 套对接机构和 2 台 GNSS 一体化天线等。

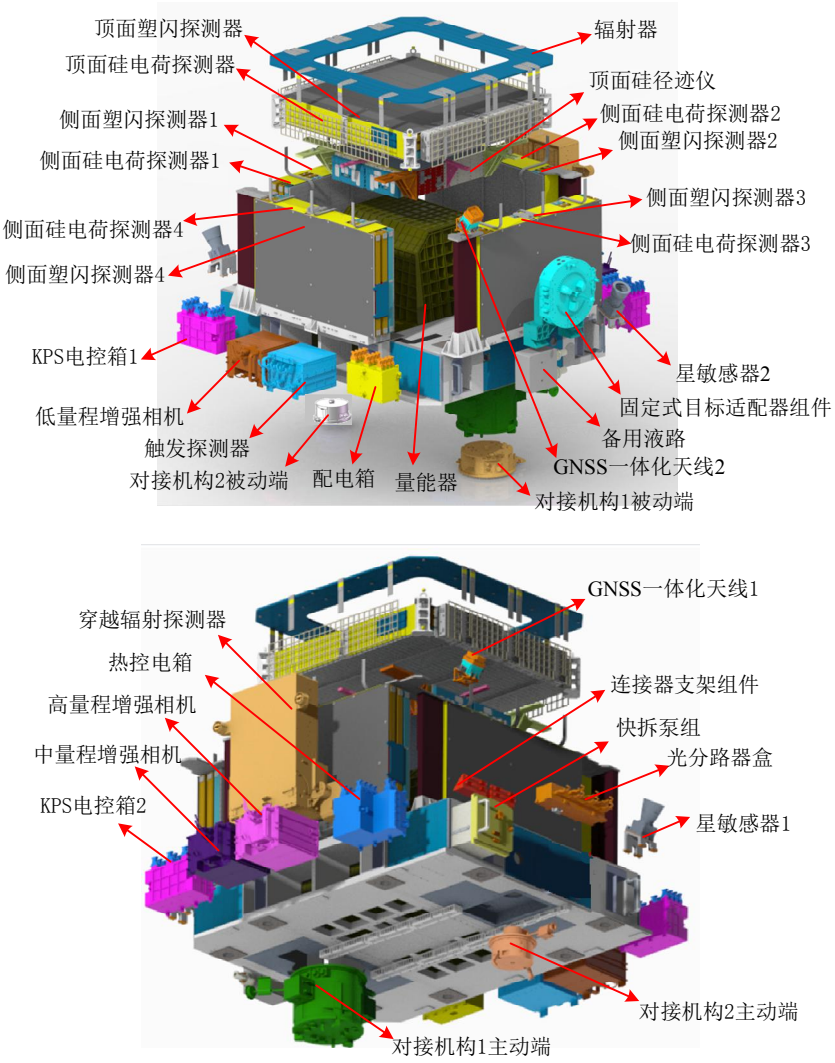


图 1-2 HERD 探测器组成爆炸示意图

1.2. HERD 探测器质量与尺寸

下表给出了 HERD 探测器上行及在轨工作状态的质量及尺寸信息。

表 1-1 HERD 总体结构技术指标及设计结果汇总表

序号	HERD 参数项目	设计结果	备注
1	HERD 探测器质量(上行)	4025kg	
2	HERD 探测器质量(在轨)	4170 kg	
3	HERD 探测器上行包络尺寸	3050mm×2630mm×1852mm	
4	HERD 探测器在轨标定包络尺寸	3200mm×3000mm×2000mm	
5	HERD 探测器在轨非标定包络尺寸	3200mm×3600mm×2000mm	

1.3. HERD 探测器配套

HERD 探测器共由 10 个子系统组成，其硬件产品配套如下表所示。

表 1-2 HERD 硬件产品配套表

序号	子系统名称及代号	产品名称	设备代号	数量	备注
1	量能器（CALO） TGKZYY30011	量能器	TGKZYY30011	1	
2	硅径迹探测器 TGKZYY30012	顶面硅径迹仪（STK）	TGKZYY3001201	1	
3		KPS 电控箱 1	TGKZYY3001202	1	
4		KPS 电控箱 2	TGKZYY3001203	1	
5	塑闪探测器（PSD） TGKZYY30013	顶面塑闪探测器	TGKZYY3001301	1	
6		侧面塑闪探测器 1	TGKZYY3001302	1	
7		侧面塑闪探测器 2	TGKZYY3001303	1	
8		侧面塑闪探测器 3	TGKZYY3001304	1	
9		侧面塑闪探测器 4	TGKZYY3001305	1	
10	硅电荷探测器（SCD） TGKZYY30014	顶面硅电荷探测器	TGKZYY3001401	1	
11		侧面硅电荷探测器 1	TGKZYY3001402	1	
12		侧面硅电荷探测器 2	TGKZYY3001403	1	
13		侧面硅电荷探测器 3	TGKZYY3001404	1	
14		侧面硅电荷探测器 4	TGKZYY3001405	1	
15	穿越辐射探测器（TRD） TGKZYY30015	穿越辐射探测器	TGKZYY30015	1	
16		穿越辐射探测器底座	TGKZYY30015-FJ01	1	
17	增强相机 TGKZYY30016	低量程增强相机	TGKZYY3001601	1	
18		中量程增强相机	TGKZYY3001602	1	
19		高量程增强相机	TGKZYY3001603	1	
20	触发探测器 TGKZYY30017	触发探测器	TGKZYY30017	1	
21	结构机构 TGKZYY3001A	主结构	TGKZYY3001A01	1	
22		固定式目标适配器组件	TGKZYY3001A02	1	
23		HERD 对接机构 1 主动端	TGKZYY3001A03	1	
24		HERD 对接机构 1 被动端	TGKZYY3001A04	1	
25		HERD 对接机构 2 主动端	TGKZYY3001A05	1	
26		HERD 对接机构 2 被动端	TGKZYY3001A06	1	
27		对接相机	TGKZYY3001A07	1	
28	热控 GKZYY3001B	HERD 快拆泵组	TGKZYY3001B01	1	
29		HERD 热控电箱	TGKZYY3001B02	1	
30		热控组件	TGKZYY3001B03	1	
31	综合电子学 TGKZYY3001C	HERD 配电箱	TGKZYY3001C01	1	
32		GNSS 一体化天线 1	TGKZYY3001C02	1	
33		GNSS 一体化天线 2	TGKZYY3001C03	1	
34		星敏感器 1	TGKZYY3001C04	1	
35		星敏感器 2	TGKZYY3001C05	1	

1.4. HERD 探测器坐标系

HERD 探测器本体几何坐标系（按空间站组合体坐标系定义）如下图所示，取 HERD 探测器底面中心为原点，OX 沿天和核心舱舱体对称纵轴，指向节点舱，OZ 轴指向天和核心舱Ⅳ象限线，OY 轴与 OX 轴和 OZ 轴垂直，指向天和核心舱Ⅲ象限线，OX/OY/OZ 轴成右手螺旋坐标系。

两台中高倍增强相机摆放在主支撑结构的-Z 轴侧面，另外一台低倍增强相机和触发探测器摆放在+Z 轴侧面。TRD 摆放在-Z 侧面。机械臂适配器在主支撑结构的+X 轴侧面。

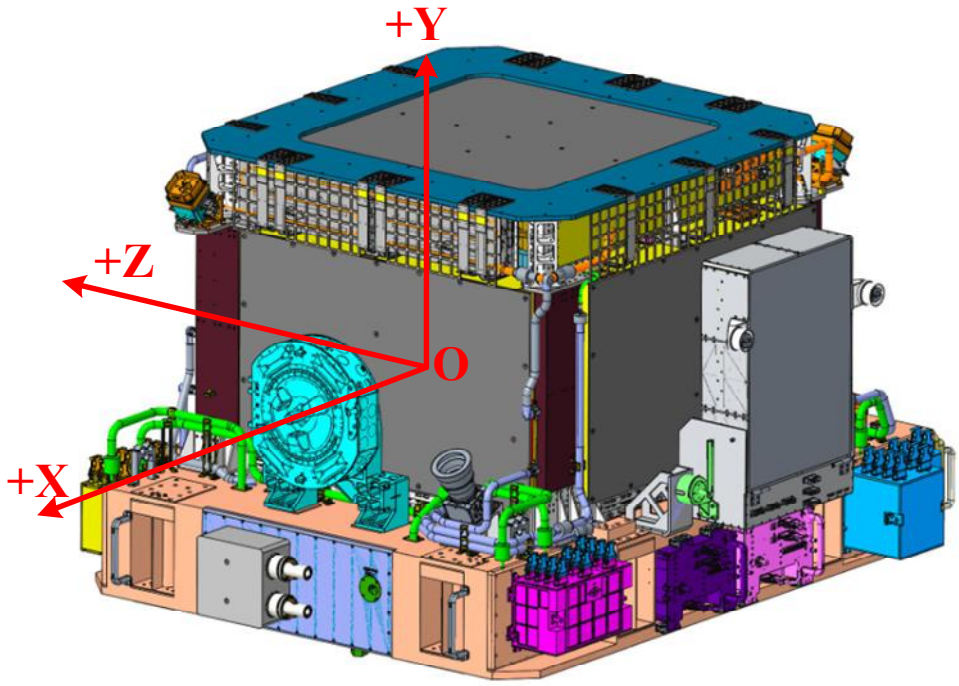


图 1-3 HERD 探测器坐标定义图

2. HERD 探测器热仿真初步要求

基于下述四个章节探测器单机的热设计方案，以 HERD 探测器整体为热仿真基础，建立至少包括硅电荷探测器、塑闪探测器、顶面硅迳迹仪和量能器的热仿真模型并完成仿真分析及报告整理工作。

四个大型载荷需建立核心器件或探测器到热控界面主要导热路径的详细模型，包括探测器、主要 PCB 及其上器件、导热产品和热控界面，以便复核单机热控设计方案和 HERD 探测器整体热控设计的合理性。四个大型载荷模型细化至单机内部板级的热仿真具体细化规模可后续结合探测器详细设计方案确定，其基本要求为能够有效的表征探测器内部详细热设计方案，其结果可用于有效评估和指导单机热控设计及地面热试验方案设计，同时为 HERD 探测器整体热控设计提供单机侧的约束与要求。

3. 硅电荷探测器热控设计

3.1. 任务需求和设计约束

3.1.1. 热控功能和指标需求

硅电荷探测器（SCD）热控设计的任务是保证 SCD 子系统各组件在全寿命周期内各阶段温度都能满足任务需求，SCD 热控设计的任务可以主要分为两个部分：

1）保证 SCD 单机内各 ladder 的温度满足其工作温度范围要求、温度稳定性要求及存储温度范围要求；

2）保证 SCD 单机各扇出电子学的温度满足在轨 I 级降额要求。

SCD 子系统内主要部组件的热控指标如下表所示：

表 3-1 SCD 子系统功耗分布及温控需求

部组件	数量	单组件功耗(W)	总功耗(W)	工作温度（℃）	存储温度（℃）[3]
顶面前端电子学[1]	8	6.07	48.56	-20~+30	-30～+40
侧面前端电子学	16	6.07	97.12	-20~+30	-30～+40
顶面硅微条传感器	1152	0	0	-20~+24	-30～+40
侧面硅微条传感器	2688	0	0	-20~+24	-30～+40
顶面扇出电子学[2]	4	20.36	81.44	I 级降额	-40～+40
侧面扇出电子学	8	20.36	162.88	I 级降额	-40～+40

1 前端电子学包含 ASIC 板和扇出板 L0

2 扇出电子学包含 L1(ADC)、L2(FPGA 板)和 L3 板(电源板)

3 原材料及元器件存储温度高于 40℃，但由于 SCD 与塑闪探测器结构和热控深度耦合，而塑闪由于物理覆盖率要求其塑闪棒间隙高于 40℃存储温度将发生挤压。

3.1.2. 外部热控界面约束

SCD 子系统属于舱外设备，使用载荷热控子系统流体回路完成散热，即热控子系统提供 SCD 子系统所需的流体回路温控界面温度控制。热控子系统为 PSD&SCD 组合单机设计有四路流体支路，其中两条支路为顶

面 PSbox 内电子学和顶面 SCD 前端电子学散热，另外两条支路为四个侧面的 PSbox 内的电子学和侧面 SCD 前端电子学散热。

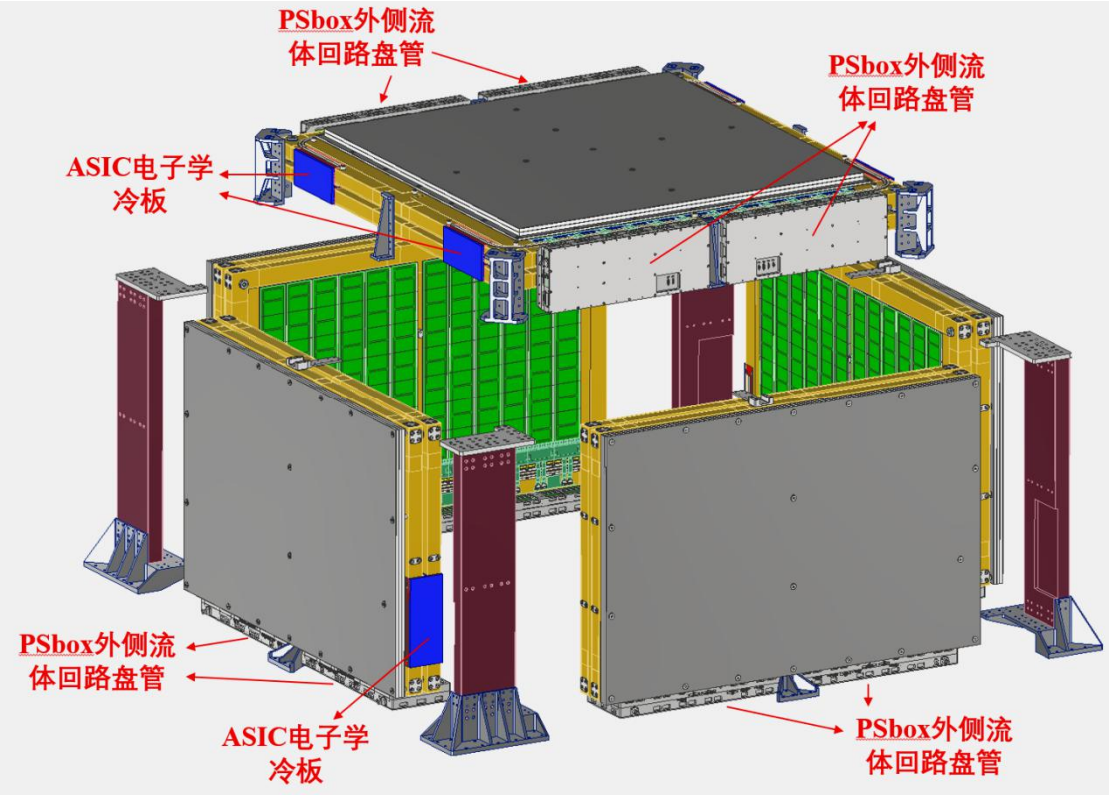


图 3-1SCD 子系统外部热控界面图

3.1.3. 全任务剖面热控内容

HERD 舱外载荷全任务剖面共分为地面测试、发射上行及贮存、大机械臂转运、在轨工作五个阶段。SCD 子系统全任务剖面对于单机热控的相关工作内容和所涉及工作模式描述见下表所示：

表 3-2任务坡面与热控工作内容

任务剖面	主要事件	热控工作内容和模式描述
发射上行及贮存阶段	发射上行、单舱自主运行、交会对接、在轨贮存	SCD 子系统不加电
大机械臂转运阶段	大机械臂转运、HERD 与平台对接供电	SCD 子系统不加电
在轨工作阶段	HERD 在轨工作	1）SCD 按照在轨工作模式加电开机，单机热控需保证单机内部温控需求； 2）部分载荷单机在轨维护更换时（有流体回路和热控保温），

任务剖面	主要事件	热控工作内容和模式描述
		SCD 在热控子系统提供的热控界面贮存温度基础上，满足单机内部贮存温度需求； 3）PPMU 更换时全部单机无法加电工作； 4）热控电箱更换时，热控子系统无法加电工作，SCD 设计根据 KPS 电箱设计视情加电保温。

3.2. SCD 构型设计

SCD 子系统位于 HERD 整体“洋葱式”布局的最外侧，布置在 HERD 主结构上板面的中央位置，呈中心轴对称分布。如**错误！未定义书签。**所示，SCD 子系统包括 1 台顶面探测器和 4 台侧面探测器，其结构同 PSD 子系统耦合一体化设计，五台探测器总体形成五面包裹的布局形式。

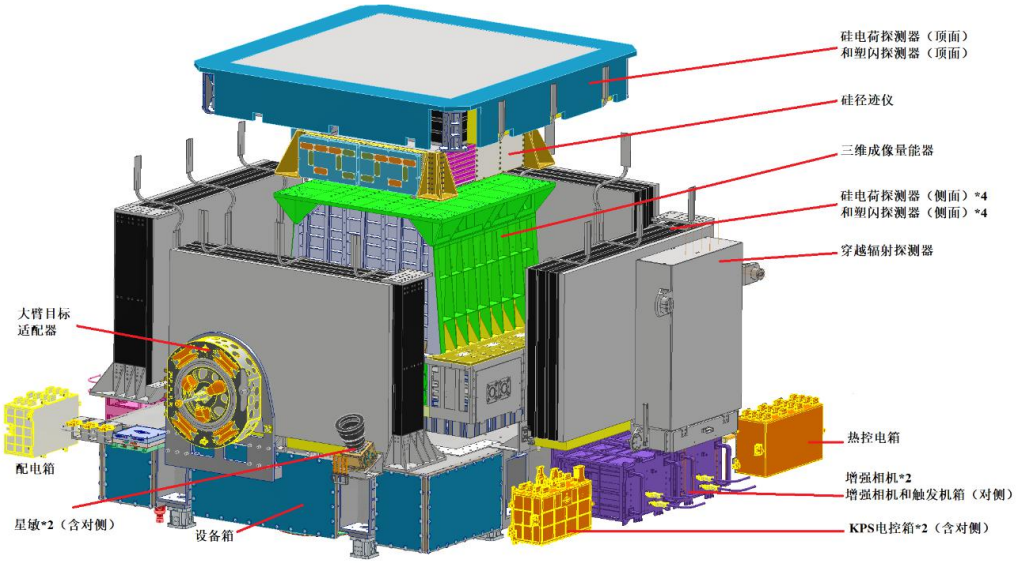


图 3-2SCD 子系统在 HERD 的位置示意图

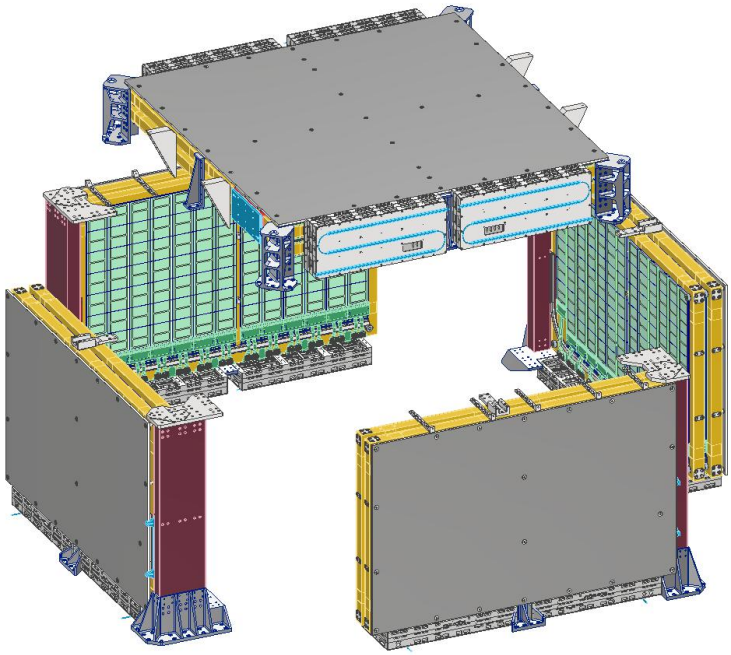


图 3-3SCD 子系统结构爆炸图

SCD 探测器位于 PSD 探测器的外部，五面覆盖保证±90°视场，碳纤维蜂窝板作为主要支撑结构，在其表面粘贴探测介质构成探测器的主体结构。为了加强整体结构刚度，将每面的 PSD 和 SCD 合并在一起，构成一台单机，顶面单机三层蜂窝板组件通过四周的电子学机箱实现层间连接，中间通过十字加强筋实现层间中心位置的互联。四台侧面单机通过电子学机箱、碳纤维管件及间隔排布的金属件保证三层碳纤维组件之间的固定，每层碳纤维组件中间都设计有一条加强筋保证中间位置的层间互联。四个面的 PSD&SCD 单机通过 PS 支撑柱结构实现四面之间的互联，用于四台侧面单机互联的顶面金属法兰为顶部 PSD&SCD 提供安装接口，四台侧面单机通过固定在底部四角的多组 L 型支撑和中间的异形安装座则作为五面 PSD&SCD 整体与主支撑结构的安装界面。

SCD 子系统探测器的探测介质为硅微条探测器，其承载主体是蜂窝板结构。硅微条探测器组件表贴于蜂窝板的上下表面，探测器组件的布局如**错误！未定义书签。**和**错误！未定义书签。**所示，共包含 4 大层呈 XY 分布的双层硅微条探测器（即 4 大层 Super-Ladder 组件），每个单层 Ladder 主要由硅片、柔性板以及前端电子学 PCB 组成。两个单层 Ladder 通过泡沫材质的硅支撑架粘在一起构成 Super-Ladder。Ladder 的胶接工艺参考 DAMPE 卫星硅阵列探测器的工艺方案。

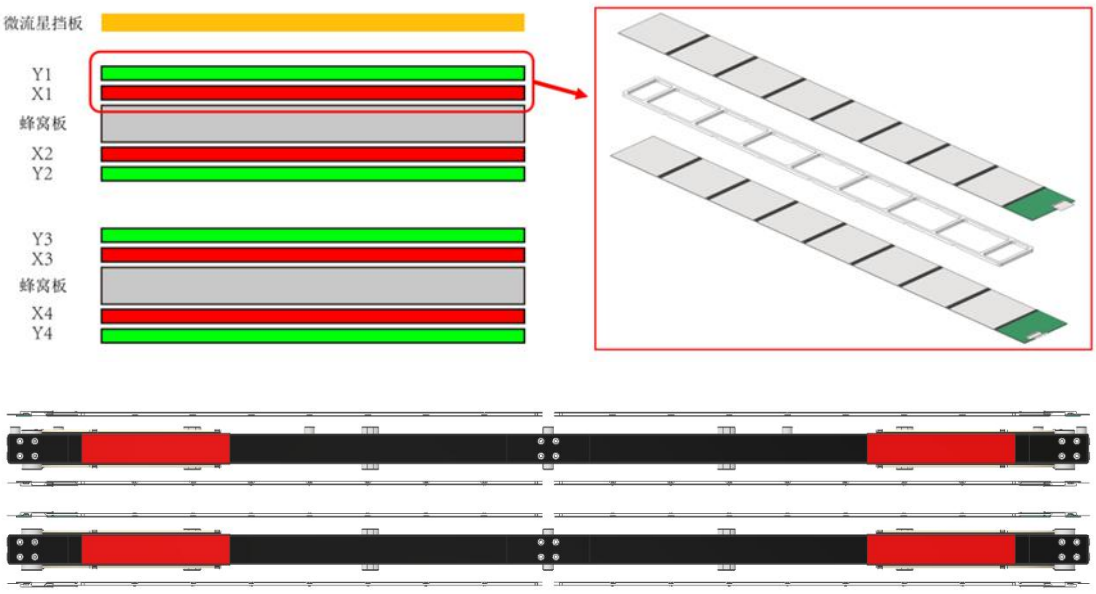


图 3-4硅微条探测器总体分布示意图

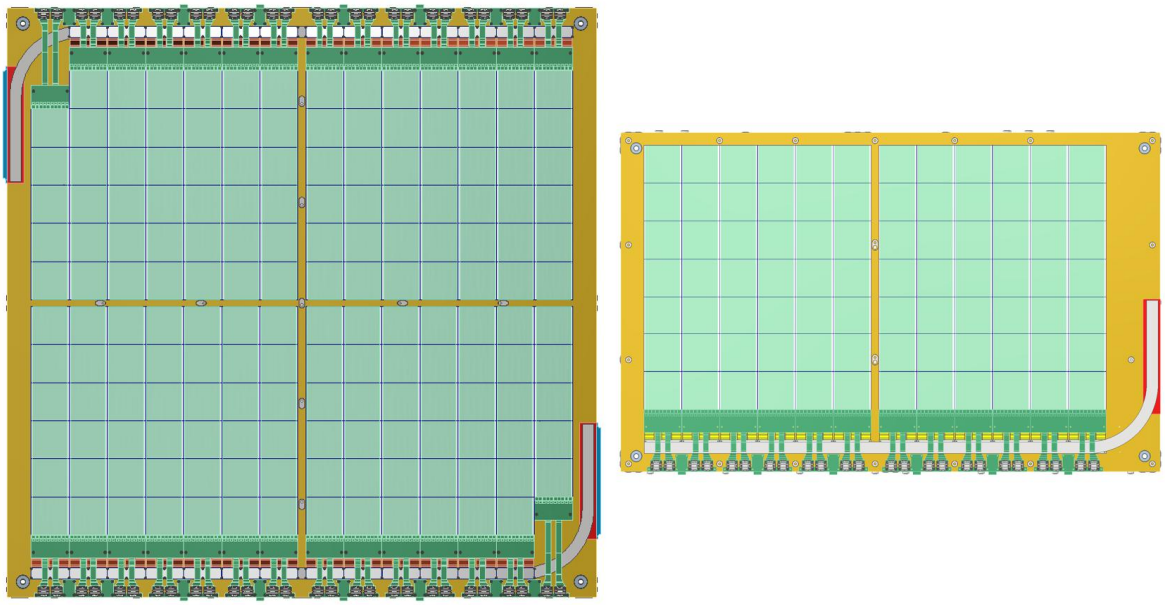


图 3-5探测器与蜂窝板胶接后示意图

单层 Ladder 由柔性电路板（PI 膜）上胶接硅探测器和前端 ASIC 电子学 PCB 组成，如**错误！未定义书签。**所示，在泡沫材质的硅支撑架上下表面分别胶接两个单层 Ladder，这样就构成了 Super-Ladder。2in1-FEH 单元由两个 Super-Ladder 和一个汇总 L0 板构成，L0 板负责 Super-Ladder 的汇总读出。

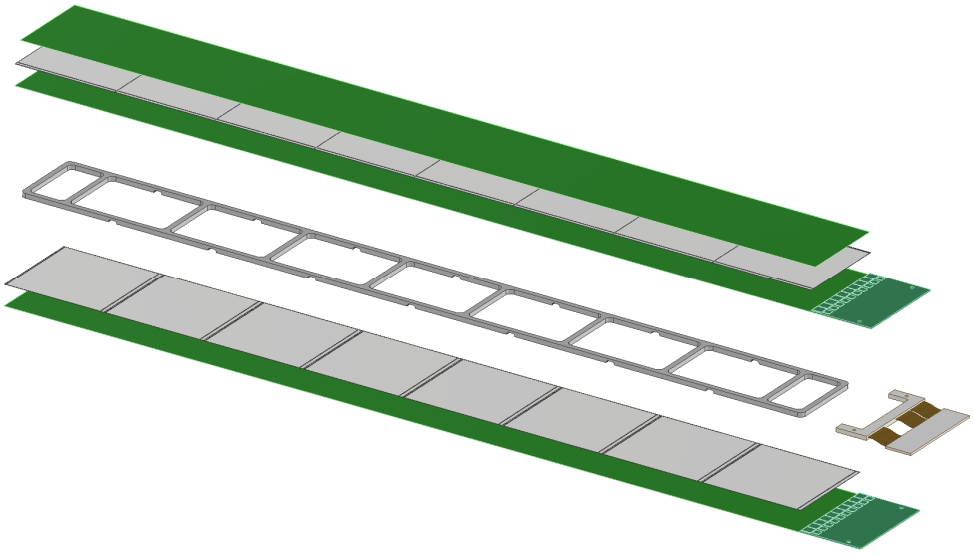


图 3- 6Super-Ladder 爆炸图

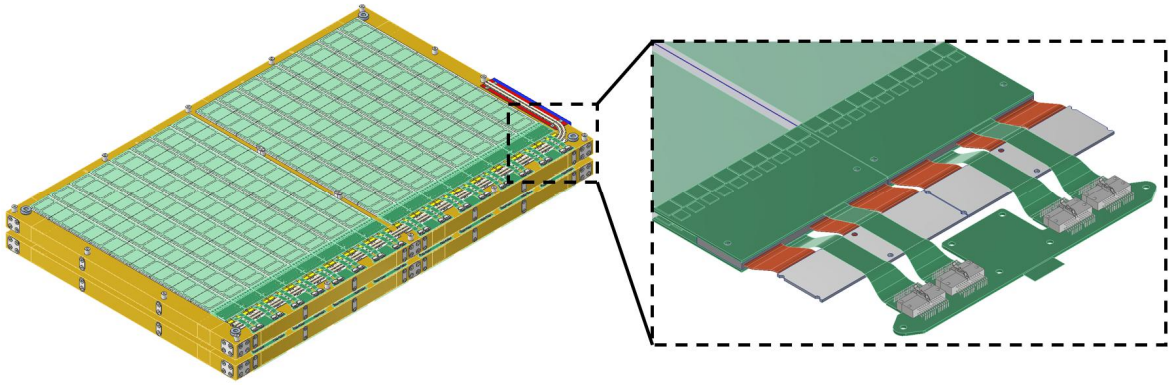


图 3- 7 2in1-FEH 示意图

3.3. 热控方案设计

3.3.1. 热控方案概述

SCD 子系统总体热控采用“流体回路为主、多级导/隔热为辅、双冗余闭环保温”的设计思路：前端 ASIC 电子学热量经 PCB→导热索→工字型热管→C 型铜角件传导至流体回路冷板排散，扇出电子学通过 PSbox 机箱表面贴装流体盘管散热；子系统间与内部关键界面设置聚酰亚胺垫片、低发射率薄膜及多层隔热组件抑制漏热，依托前端电子学内置测温点与硅片外置测温点实现温度监测，配合导热索硬端加热器及 KPS 电箱/热控电箱双备份供电，在全任务剖面下满足各组件工作、存储温度及稳定度要求。

表 3-3 SCD 部组件表热特性表

名称	材料	热导率 W/(m·K)	比热容 J/(kg·K)	密度 kg/m³
硅片	单晶硅	148	703	2329
偏压板	FR-4	厚度 150 um	~1300	1850
ASIC 板	PCB	/	/	/
L0 板	FR-4	厚度 1.6 mm	~1300	~1900
Z 型走线板	聚酰亚胺	0.25	1090	1420
硅支撑架（ALREX 骨架）	型号 R82.60	0.036	~1100	60
导热索热端	6063	130	900	2700
导热索冷端	6063	130	900	2700
导热索铜皮	铜	400	385	8960
导热件	6063	130	900	2700
热管	1060	~230	900	2700
碳纤维蒙皮、碳纤维框架（蜂窝板）	CFRP-M55J	X:50、Y:1、Z:1	~712	1910
铝蜂窝芯子	铝合金			
铜角件	铜	400	385	8960
隔热垫	聚酰亚胺	0.25	1090	1420
辐冷板	铝蒙皮铝蜂窝板			
碳纤维蜂窝芯和碳纤维蒙皮（挡板）	M40		~712	1810
PSbox 机箱内框架、中框架、外框架	MB15	~121.4	1034	1800
不锈钢螺钉	1Gr18Ni9T	~16.3	500	~7930
钛合金螺钉	TB3、Ti22	~10/~21.9	540/560	4840/4420
安装支座	7075	~130	960	~2810
粘接胶	3145	~0.2	~1000	1120

粘接胶	9186L	~0.2	~1000	1020
导热胶	GD414	~0.2	~1000	~1100
PS 支撑柱（上、下金属件）	7075	~130	960	~2810
PS 支撑柱（碳纤维立柱）	ccM55J\氰酸酯复合材料	X:50、Y:1、Z:1	~712	1910

SCD 子系统五面集成体的外包络尺寸为 2086mm×1838mm×1290mm（含辐射器及其表贴热管），本体尺寸≯1748mm×1748mm×1264mm，相关尺寸图如下图所示。

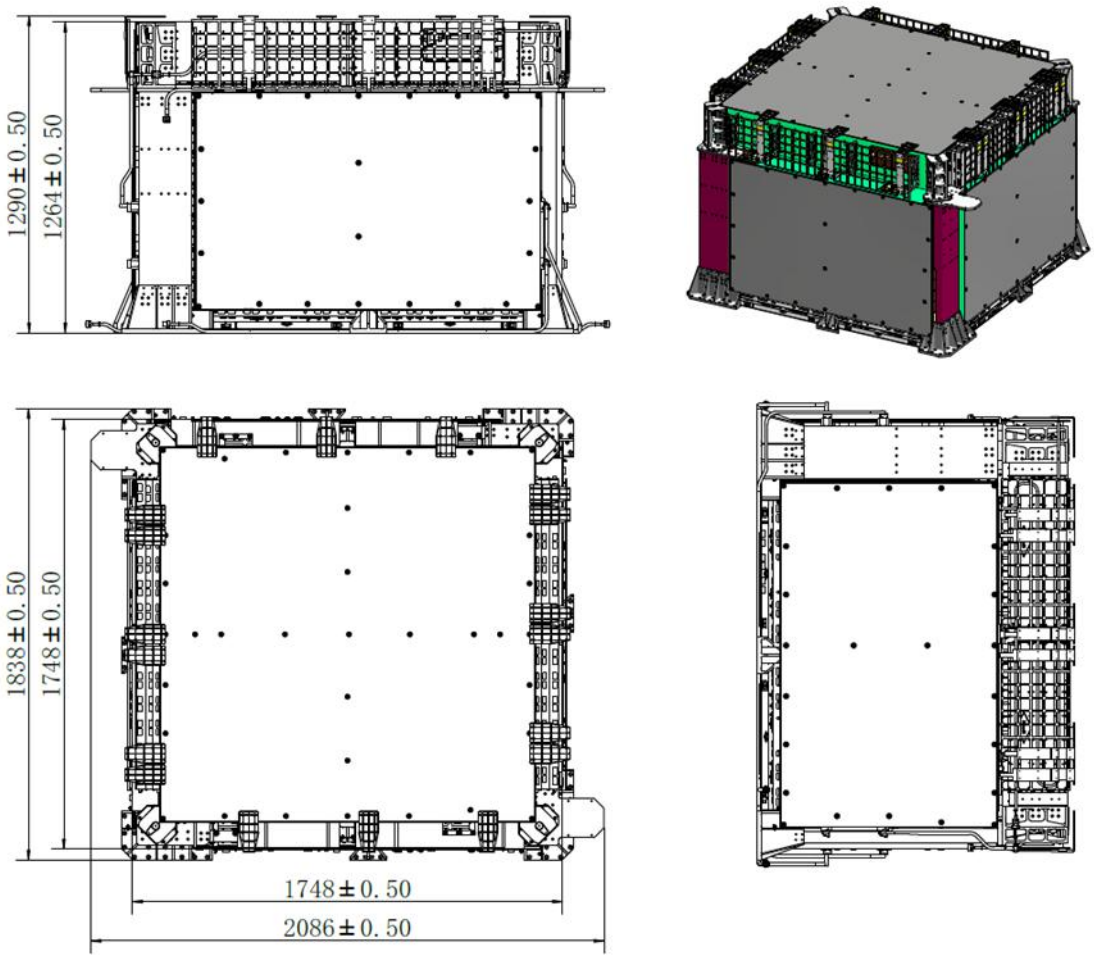


图 3-8 SCD 子系统尺寸图

SCD 载荷子系统的详细质量分布见下表。

表 3-4 SCD 子系统质量分布表

部组件名称	位置	材料	零件质量/kg	数量	部件质量/kg	部件总质量/kg	质量占比
硅片	顶面	硅	9.5	1	9.5	30.3	7.0%
	侧面		5.2	4	20.8		
前端电子学	顶面	/	13.5	1	13.5	39.9	9.2%
	侧面		6.6	4	26.4		
硅支撑架	顶面	塑料	0.8	1	0.8	2.8	0.6%
	侧面		0.5	4	2		
PSbox 机箱	顶面	镁合金	4.5	4	18	46.8	10.8%
	侧面		3.6	8	28.8		
扇出电子学	顶面	/	3	4	12	36	8.3%
	侧面		3	8	24		
蜂窝板	顶面	/	19.5	2	39	123	28.4%
	侧面		10.5	8	84		
热管	顶面	1060	0.5	8	4	11.5	2.7%
	侧面		0.47	16	7.5		
安装支座	顶面	铝合金	12.6	1	12.6	19.8	4.6%
	侧面		1.8	4	7.2		
遮光板及板间连接件	顶面	玻璃钢	2	1	2	10	2.3%
	侧面		2	4	8		
挡板	顶面	/	4.8	1	4.8	15.2	3.5%
	侧面		2.6	4	10.4		
导热索	顶面	铝、铜	4.5	1	4.5	12.5	2.9%
	侧面		2	4	8		
多层隔热组件	顶面	/	2.8	1	2.8	6.4	1.5%
	侧面		0.9	4	3.6		
辐射器支架	/	/	2	4	8	8	1.8%
PS 支撑柱组件	/	/	14.4	4	57.6	57.6	13.3%
线缆	/	/	5	1	5	5	1.2%
紧固标准件	/	/	8.8	1	8.8	8.8	2.0%
总计						433.7	

3.3.2. 功耗分布

3.3.2.1.前端电子学功耗分布

SCD 前端电子学包括硅微条探测器模块(Ladder)和 L0 板。SCD 前端

电子学使用模块化设计，每 4 个 Ladder 和 1 个 L0 板组成 1 个前端模块。每个 Ladder 的热耗集中在 SFE 板，每个 SFE 板的功耗为 219.7 mW；1 个 L0 板的功耗为 133.0 mW；合计 1011.72 mW。这些热量会通过 SFE 板与 L0 板之间的热管导出到界面。

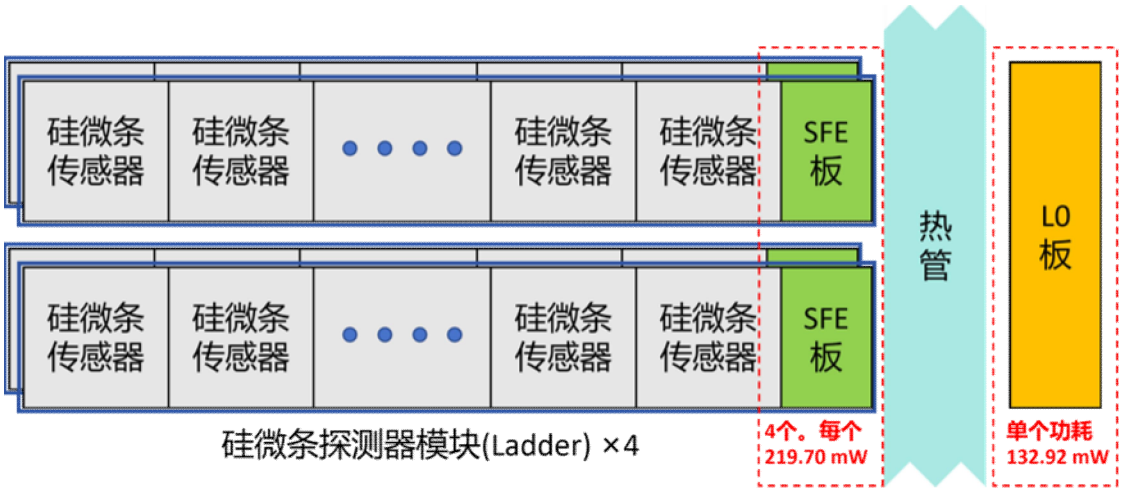


图 3-9 一个前端模块（4 个 SFE 板和 1 个 L0 板）的功耗分布图

顶面 SCD 包含 4 大层，每大层使用 2 根热管散热。每根热管接 6 个前端模块，即包含 24 个 SFE 板和 6 个 L0 板，功耗 6.07 W。顶面 SCD 共使用 8 根热管，前端总功耗 48.56 W。

每个侧面 SCD 包含 4 大层，每大层使用 1 根热管散热。每根热管接 6 个前端模块，包含 24 个 SFE 板和 6 个 L0 板，功耗 6.07 W。每个侧面 SCD 使用 4 根热管，前端总功耗 24.28 W。4 个侧面 SCD 共使用 16 根热管，前端总功耗 97.12 W。

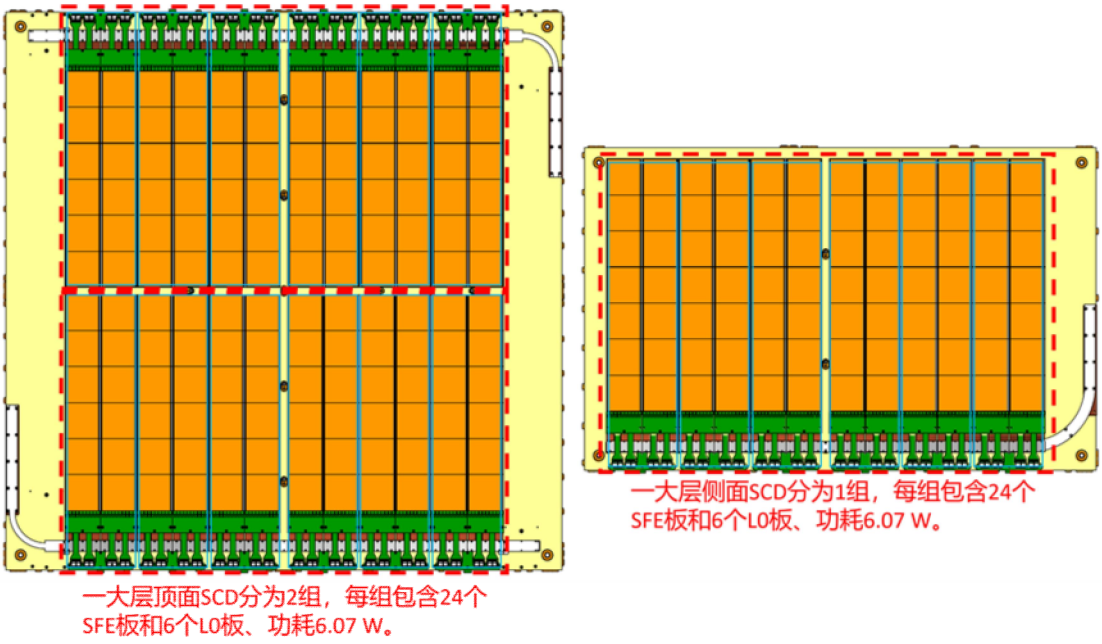


图 3-10 一大层顶面和侧面 SCD 的前端 功耗

3.3.2.2. 扇出电子学功耗分布

SCD 子系统有 12 个扇出电子学，其中顶面 SCD 有 4 个、每个侧面 SCD 有 2 个。每个扇出电子学的功耗相同，均为 20.36 W。SCD 子系统的 1 个扇出电子学与 PSD 子系统的 1 个读出电子学安装在 1 个 PSBox 机箱中，集中采用流体回路进行散热。另外，除了 SCD 的扇出电子学外，PSbox 机箱内还安装了 PSD 的读出电子学。一共有 12 个 PSbox 机箱，每个机箱的功耗一致，初期总功耗约 40.54W，其中 SCD 20.36W，PSD 20.18W；末期总功耗约 45.08W，其中 SCD 20.36W，PSD 24.72W。

3.3.3. 散热设计

SCD 子系统的热耗主要分为两个部分，分别是前端 ASIC 电子学和扇出电子学，这两部分电子学均采用流体回路散热。ASIC 电子学与流体回路冷板之间采用热管和导热索等直接热导通；扇出电子学安装在 PSbox 机箱内，机箱表面贴流体回路盘管直接对其散热。

3.3.3.1. 前端 ASIC 电子学散热设计

根据 HERD 探测器特点，及外部热控约束等条件，SCD 前端 ASIC 电子学的散热设计为依靠 HERD 探测器流体回路冷板散热。ASIC 电子学的导热路径如下图所示，ASIC 芯片的热量首先传至印制 PCB 板，再经导热索传至热管，由热管将热量传至位于蜂窝板侧边的 C 型铜角件，流体管路冷板直接贴在铜角件上将热量带走。

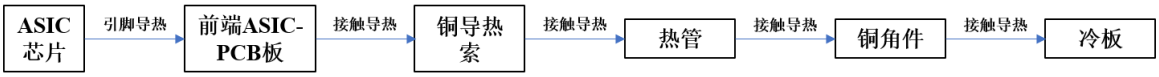


图 3-11ASIC 电子学导热路径图

硅探测器其胶接于柔性电路板之上（胶黏剂为走线式而非满铺），每片探测器之间使用键合丝相连。每个 ladder 的 ASIC 电子学板同样胶接于柔性电路板之上（胶黏剂同样为走线式而非满铺，后续可以考虑增加涂胶量增加胶接面积增强导热），同相邻硅探测器使用键合丝相连接。

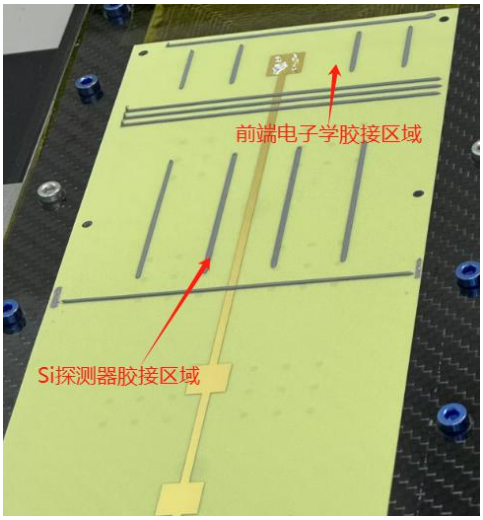


图 3-12ladder 胶接前端电子学和硅片涂胶示意图

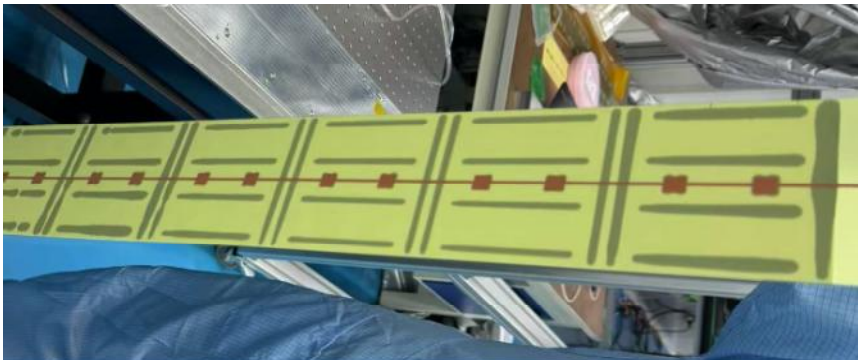


图 3-13ladder 胶接硅片固化后涂胶痕迹图

蜂窝板上下两个表面均胶接 ladder，胶接面为碳纤维蒙皮和 ladder 柔性电路板，胶接涂胶为“S”或“回”字形走线式，而非满铺胶黏剂的胶接形式（后续视热设计仿真结果考虑在 ASIC 电子学 PCB 位置增加涂胶量，以增加胶接接触面积）。L0 板使用胶接加螺钉的方式固定于蜂窝板蒙皮之上。

为了尽可能降低前端电子学与冷板间的热阻，如**错误！未定义书签。**所示，在 Ladder 的 ASIC 板与 L0 板之间的间隙放置两根热管，热管型谱为 30×9.1 工字型双孔热管，该热管的常温最大传热能力为 208 W·m。同时，Super-ladder 的上下两块 ASIC 电子学板之间布置一个铜导热索，用于将 ASIC 电子学的热量快速导出至热管；L0 板功耗则通过碳纤维蒙皮传导至热管并导出。

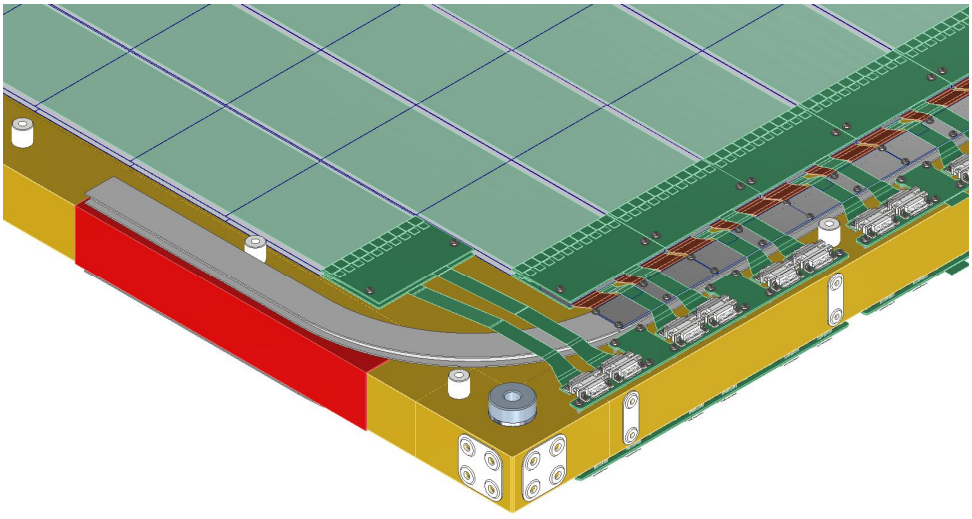


图 3-14 SCD-ASIC 电子学冷板和热管安装位置示意图

前端 ASIC 电子学及 L0 板的散热路径图如下图所示，导热索与 Super-Ladder 一一对应，上下两个 Ladder 产生的热经由 PCB 板分别传至导热索热端的上下表面，再通过导热索经由冷端传至热管，L0 板上的热量则通过铝导热件传至热管。

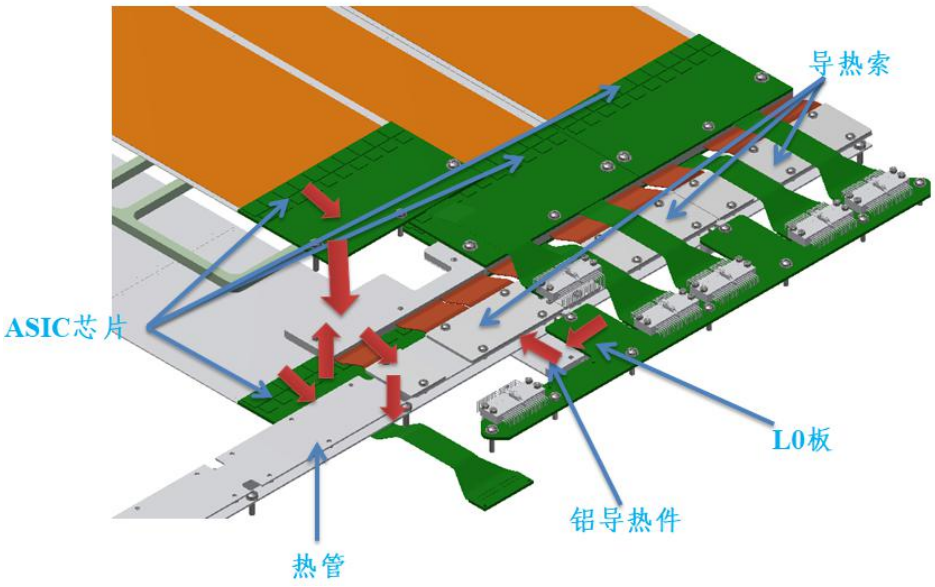


图 3-15 导热索导热设计示意图

导热索的设计如下所示，由两块铝金属板之间焊接铜皮制成，其冷热端分别为 2mm、3.97mm 厚的铝板，连接二者的材料为 0.5mm 厚的紫铜皮。热端铝板的上下表面分别与 Super-Ladder 的上下两层 ASIC 板的表面胶接，同时用两个螺钉将两层 PCB 板及热端铝板牢牢固定在蜂窝板上，冷端铝板紧固在热管的上表面。蜂窝板的侧边增加 1 mm 厚的“C”型铜角件，用于蜂窝板全部组装完毕后同侧面冷板相连接，完成导热路径的连通。

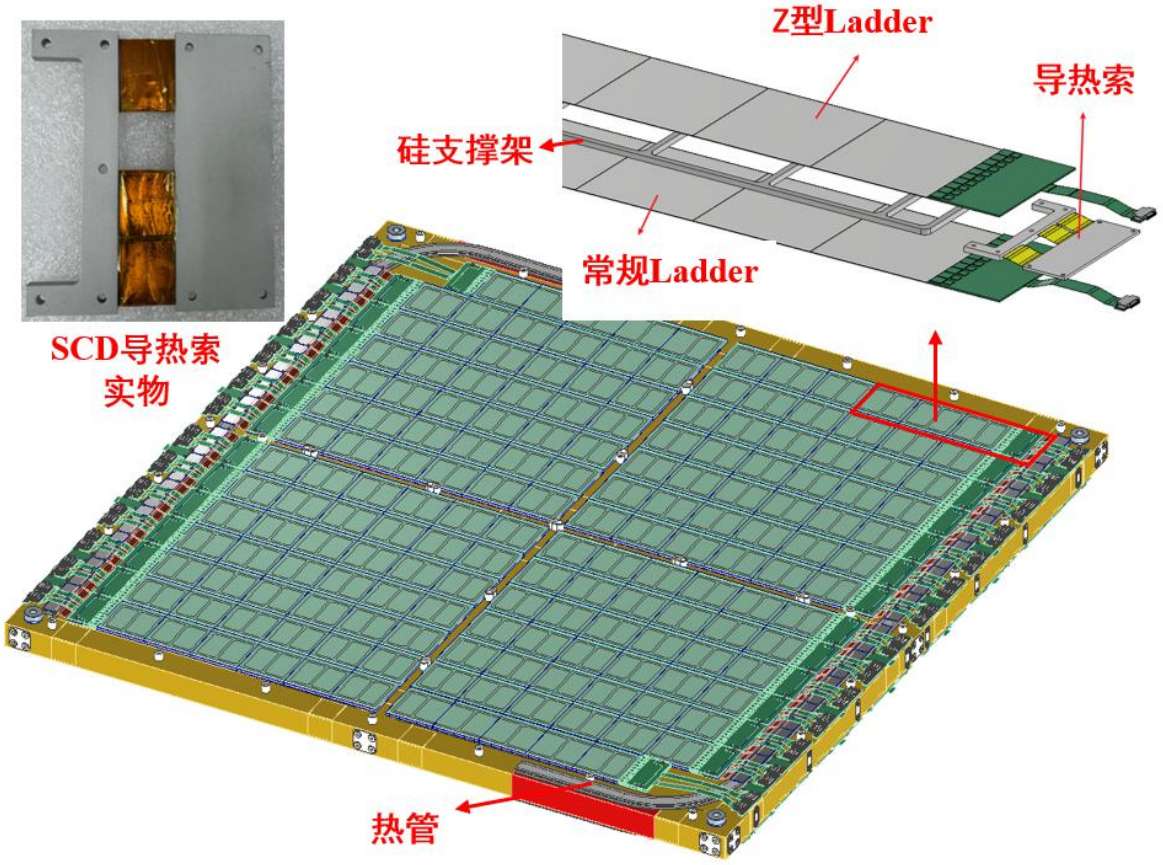


图 3-16SCD 导热索示意图

3.3.3.2.扇出电子学散热设计

PSbox 机箱隔热安装在蜂窝板侧面位置，其结构为镁合金金属笼屉式结构。顶面 PSbox 机箱分布在蜂窝板结构的迎背风面；侧面 PSbox 学箱均分布在蜂窝板结构的底部。机箱内部功耗大的 DC-DC 模块等一类器件直接安装在靠近盘管的外框架上，如无法安装到金属结构的器件则使用导热铜箔等建立和外壳的导热路径，PCB 和结构安装接触面做金属化处理降低其安装热阻。PSbox 机箱屏蔽盖金属结构与流体回路盘管导热安装，其热量由流体回路收集后排散。

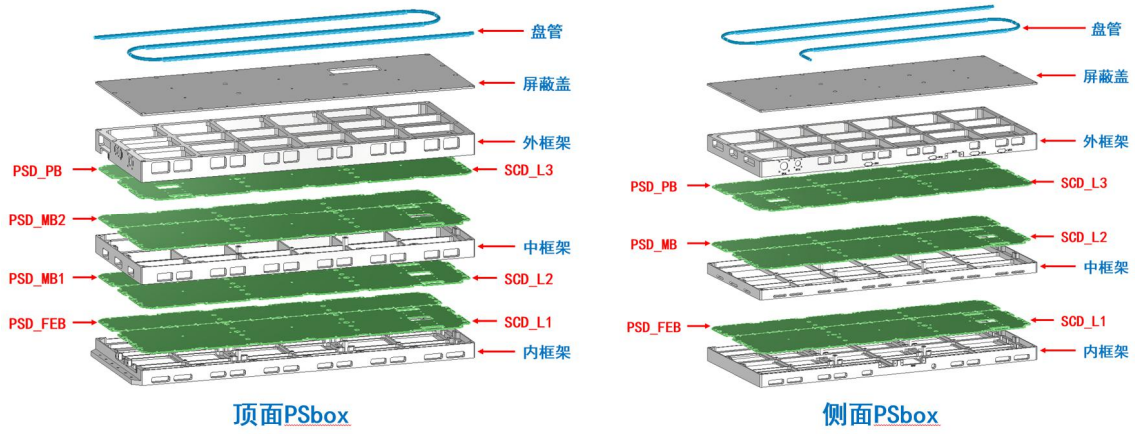


图 3-17 PSbox 机箱内高功耗元器件与结构安装示意图

3.3.4. 隔热设计

由于 HERD 各子系统的控温不同，为减少子系统间的漏热，SCD 子系统对外设计了许多隔热措施：

1）HERD 主结构上表面 SCD 子系统的安装面设计隔热垫，减少 SCD 子系统与主结构的导热换热；

2）侧面 SCD，微流星挡板外增加 1mm 厚碳纤维蒙皮，蒙皮与挡板隔热安装，4 点安装，钛合金螺钉，间距 15mm，在微流星挡板外表面包覆 10 单元多层，在蒙皮外表面包覆 20 单元多层，最外层面膜为防原子氧β布。顶面 SCD，微流星挡板外增加 1mm 厚碳纤维蒙皮，蒙皮与挡板隔热安装，4 点安装，钛合金螺钉，间距 8mm，在微流星挡板外表面包覆 10 单元多层，在蒙皮外表面包覆 10 单元多层，最外层面膜为防原子氧β布。

3）SCD 蜂窝板与 PSD 蜂窝板接触面均设计聚酰亚胺隔热垫，减少 SCD 蜂窝板与 PSD 蜂窝板的导热换热；

4）PSD 蜂窝板面向 SCD 蜂窝板这一侧表面贴低红外发射率薄膜，减少 PSD 蜂窝板与 SCD 子系统之间的辐射换热；

5）微流星挡板、PS 支撑柱组件等外露面覆盖多层隔热组件，减少空间外热流对 SCD 子系统的影响；

6）辐冷板内表面覆盖多层隔热组件，减少辐冷板与 SCD 子系统之间的辐射换热。

由于 SCD 子系统前端 ASIC 电子学、硅微条探测器与扇出电子学的控温不同，SCD 子系统内部设计了相关隔热措施：

1）PSbox 机箱与蜂窝板侧面增加多层隔热组件，减少 PSbox 机箱与蜂窝板及其他结构的辐射换热；

2）SCD 蜂窝板上的安装接口均设计聚酰亚胺隔热垫，减少蜂窝板间、蜂窝板与安装支座、蜂窝板与 PSbox 机箱的导热换热。

3.3.5. 测温设计

HERD 探测器的全生命周期中，地面实验和实际在轨均需要通过一系列温度敏感器进行实时的温度监测。由于 PSD 载荷中 sipm 的每一块小板上均内置测温点，SCD 载荷中前端电子学同样内置测温点，无需进行额外的测温点设计。对于 HERD 探测器中温度要求较高的零部件，仅 SCD 中的硅片缺少温度监测。硅片上不能直接粘贴温度敏感器，因此就近在其四周或中间的碳纤维上布置测温点：

3.3.6. 保温设计

SCD 保温设计拟在前端电子学导热索硬端胶接加热器，同时配合热敏电阻测温实现 SCD 的闭环保温。考虑到热控子系统保温和单机自行保温设计相结合以简化整体保温设计方案，两者保温可使用同位备份的方式布置加热器。保温加热的具体功率需求见下述 PSD&SCD 热仿真章节。

在热控子系统故障无法维持载荷温度时，KPS 电箱开启保温模式，为导热索硬端加热器供电保温。两台 KPS 电箱初步设计为前端探测器提供共 200W 保温功率，其中 SCD 仅需较小的保温功率，具体参加下述仿真分析。

在 PPMU 故障无法为 HERD 供电时，热控子系统切外部供电进行载荷保温，此时热控子系统同样为导热索硬端加热器供电保温，且 SCD 内部布置测温点由热控子系统进行保温温度闭环控制。

3.4. SCD 结构材料补充说明

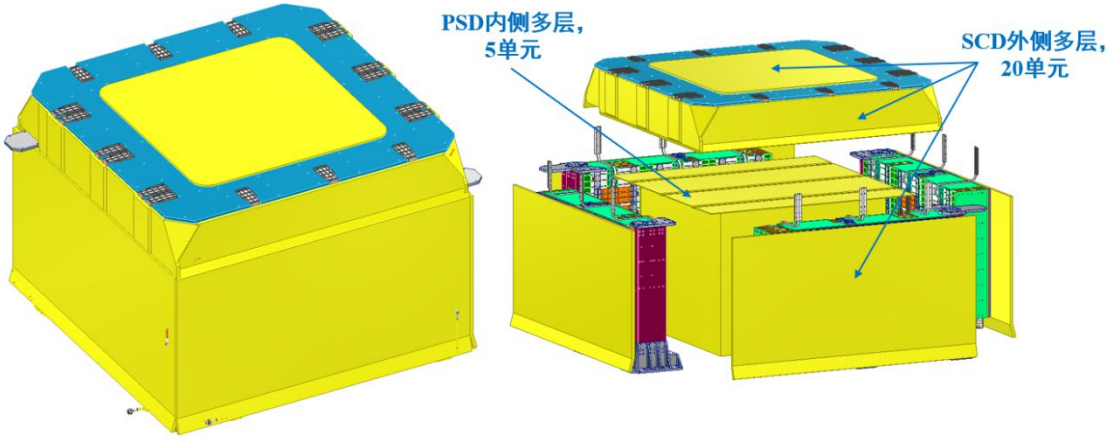


图 3-18 多层总体布局示意图

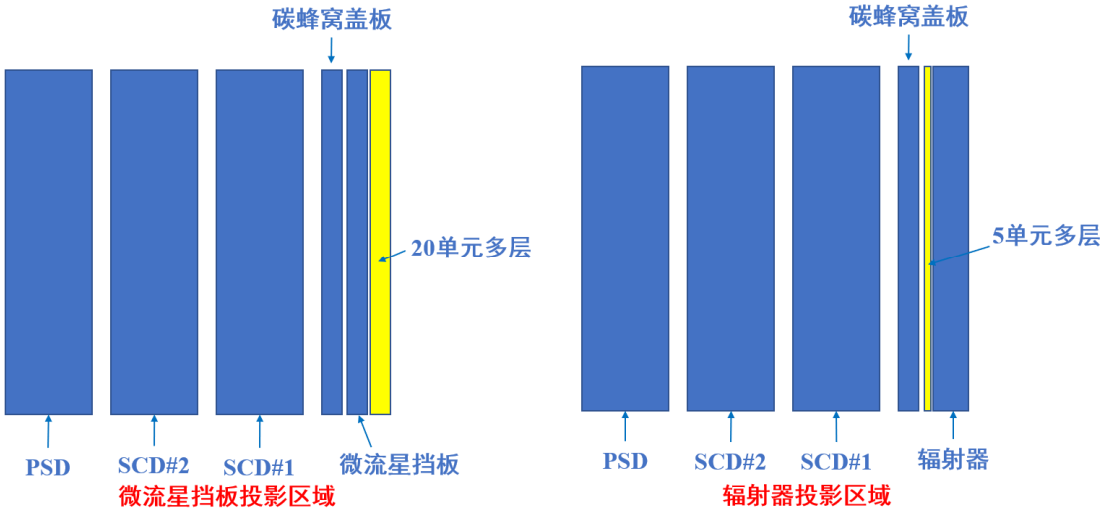


图 3-19 顶面 SCD 外侧多层布置情况

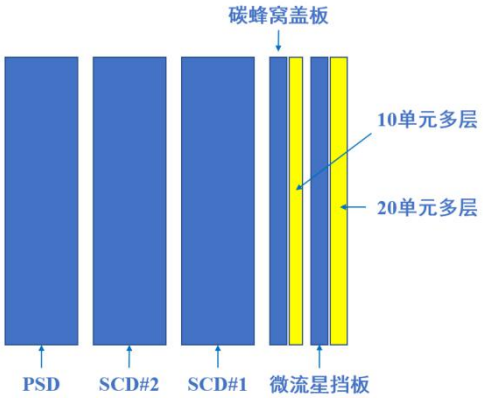


图 3-20 侧面 SCD 外侧多层布置情况

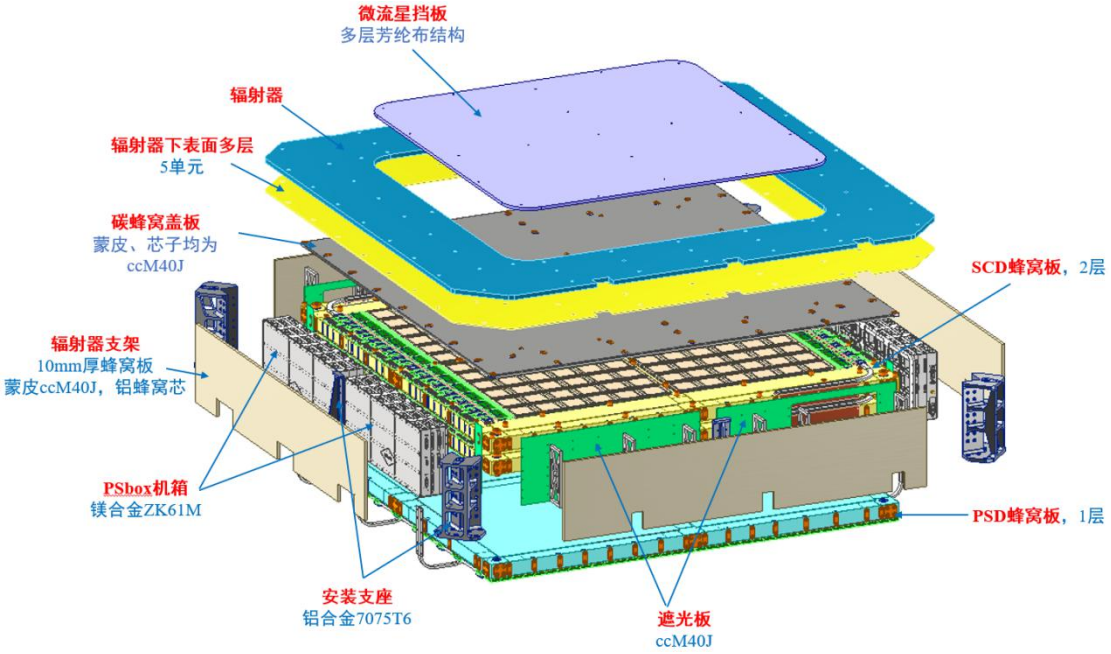


图 3-21 顶面 PSD&SCD 爆炸图

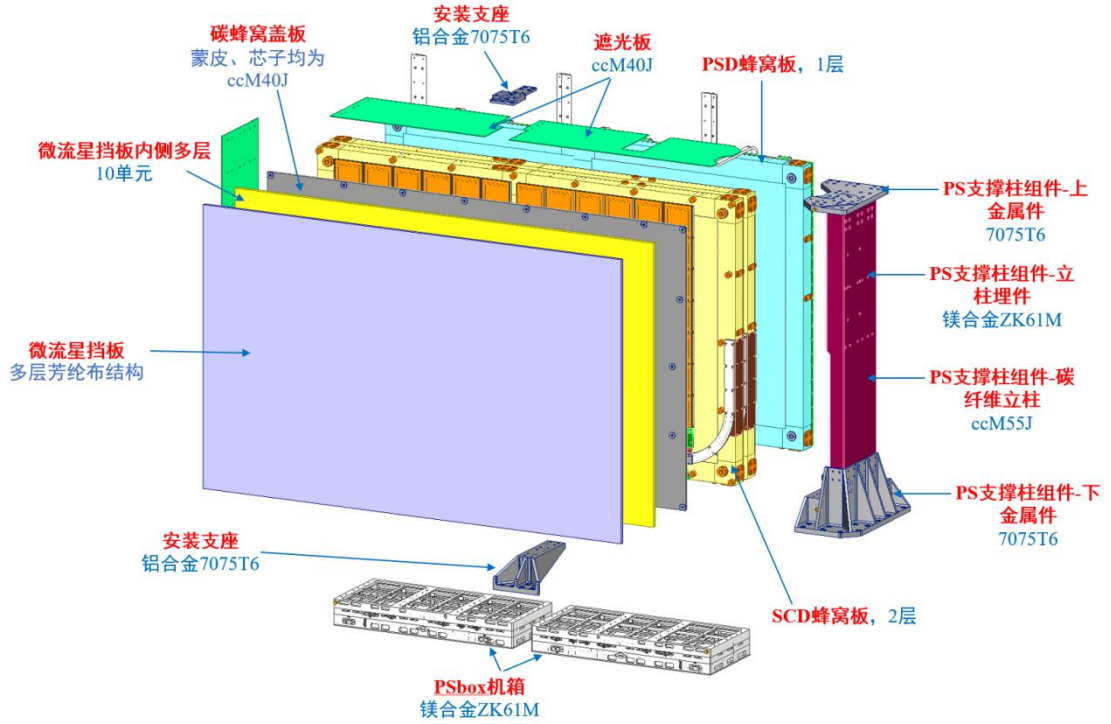


图 3-22 侧面 PSD&SCD 爆炸图

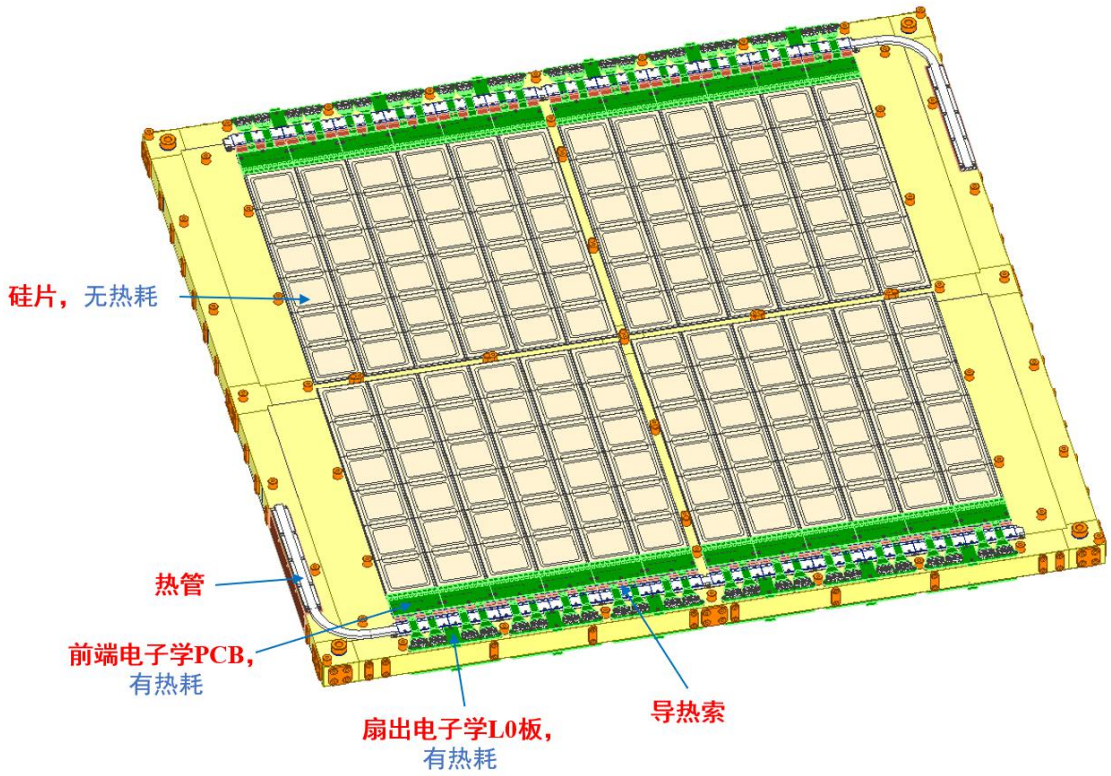


图 3-23 SCD 蜂窝板探测器组件示意图

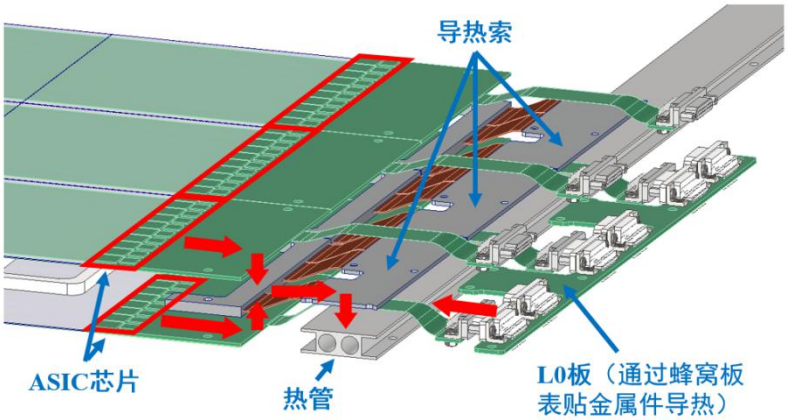


图 3-24 SCD-Ladder 导热路径

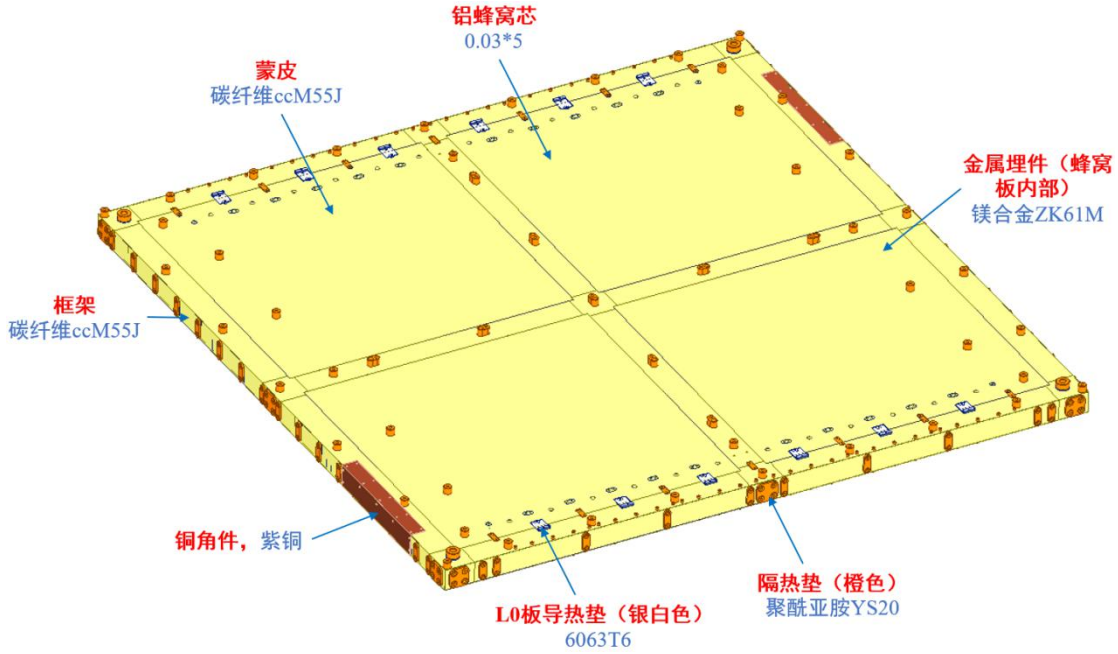


图 3-25 蜂窝板结构示意图

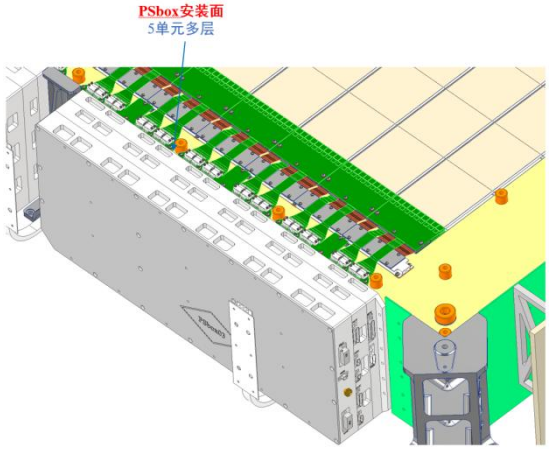


图 3-26 PSbox 安装示意图

4. 塑闪探测器热控设计

4.1. 任务需求和设计约束

4.1.1. 塑闪探测器单机热控功能和指标需求

塑闪探测器（PSD）热控设计的任务是保证 PSD 子系统各组件在全寿命周期内各阶段温度都能满足任务需求，PSD 热控设计的任务可以主要分为三个部分：

1）保证 PSD-SiPM 芯片温度满足其工作温度范围要求、温度稳定性要求及存储温度范围要求；

2）保证 PSD 塑闪单元硅胶耦合垫温度满足其工作温度范围要求及存储温度范围要求，防止其因环境温度超标造成不可逆损伤；

3）保证 PSD 读出电子学温度满足在轨 I 级降额要求及温度稳定度要求。

塑闪具有热胀冷缩的特性，但为了满足高几何覆盖率的性能需求，设计时塑闪的最高存储温度为+40℃。存储温度过高，导致塑闪单元热膨胀发生塑闪损坏，导致探测功能失效，将导致 HERD 整体触发率偏高，从而导致预定科学目标探测效率降低。

SiPM 热需求分析如下：

由于 PSD 中为了实现更小的结构单元，使用 SiPM 作为光读出器件。而 SiPM 受到空间辐照的影响后暗电流变大，暗噪声增加，暗噪声可能会过阈触发导致 PSD 产生误触发信号，导致伽马信号被误反符合掉，影响伽马探测效率，因此需要分析该影响，提出相应的措施。

SiPM 的暗噪声、暗电流随温度下降而降低，S13360-6050 型号的 SiPM 每 5.4℃暗噪声率降低一倍，电流降低。因此，保持 SiPM 区域低温可有效缓解暗噪声和热的影响。根据轨道和屏蔽厚度的等效估算，对 PSD 所采用的 S13360-6050 型号，在中国东莞散裂中子源进行了等效辐照实验。根据辐照结果，10 年等效辐照注量下，暗电流增大了 1300 倍@54.5 V，现场单路 SiPM 暗噪声 1500 kHz@17 p.e.。

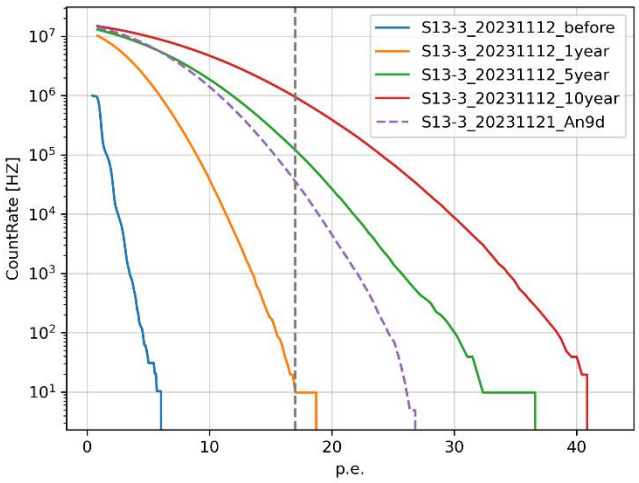


图 4-1 SiPM 辐照前后的暗噪声随阈值的频率变化

为了降低辐照的影响，每条塑闪单元设计了多路 SiPM 信号进行符合运算来降低暗噪声过阈的影响。根据辐照结果估算了不同温度下，不同触发时间窗下（ τ =100ns、200ns、400ns）暗噪声导致的偶然符合事例率。当触发符合时间<400ns 时， 考虑极端情况——故障导致每条塑闪上的 2 路 SiPM 损坏，其它 6 路 SiPM 信号满足 4 路同时有信号，认为该塑闪单元被真实粒子击中。在以上条件下，需要 SiPM 区域温度低于+5℃时，伽马被暗噪声误 Veto 的概率≯25%，在 HERD 整体可接受范围内。因此，SiPM 区域的温度上限为+5℃。SiPM 和光导垫的工作温度下限为-40℃，根据试验，低于-35℃时，光导垫变硬，在受力时容易碎裂。

根据 SiPM 内部散热模拟，工作时的辐冷板界面温度要低于 SiPM 区域，工作时的界面温度需-35～-5℃。

由于 SiPM 热源非常分散，在热控设计时采用了大量的石墨导热锁，强化热量传递：由于寿命末期 SiPM 的热耗增加，仅靠自身导热和辐射的方式难以将塑闪的温度控制在合理范围内，因此在每个 SiPM 的发热元件上安装一根石墨导热锁，将热量传导至安装在附近的铝板或热管翅片上，并通过热管将铝板上的热量传导至辐冷板。

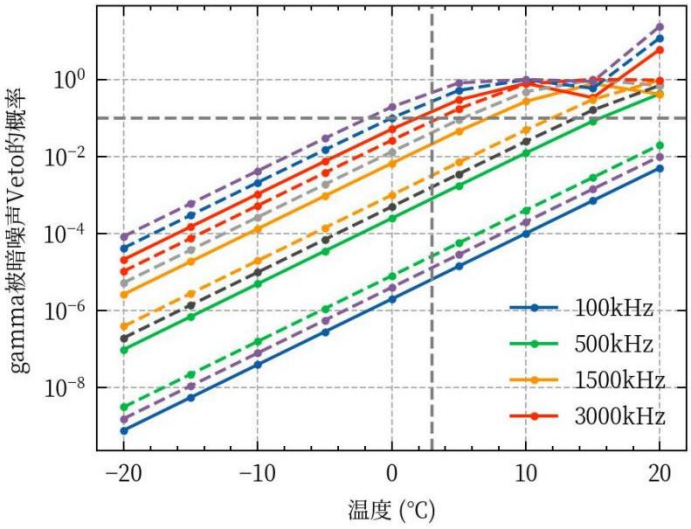


图 4-2 不同的 SiPM 暗噪声过阈计数率下，造成的误 veto 概率随温度的变化

综上，PSD 子系统内主要部组件的热控指标如下表所示：

表 4-1PSD 功耗分布及温控要求

子系统	部组件	数量	单组件功耗（W）	总功耗（W）	工作温度（℃）	存储温度（℃）	温度稳定度	温度均匀性
PSD	顶面 SiPM 初期	1	<1	<1	-30~+5	-40~+40	≤10℃/hr&≤1℃/min（SiPM 热管侧）可接受短时超出	塑闪单元分区内差异低于 3℃
	侧面 SiPM 初期	4	<1	<1				
	顶面 SiPM 末期	1	7.2	7.2				
	侧面 SiPM 末期	4	4.2	16.8				
	塑闪	108	0	0	-35~+40	-40~+40	/	/
	塑闪	252	0	0				
	顶面读出电子学（PSbox）（初期）	4	20.3	81.2	I 级降额	I 级降额	/	/
	顶面读出电子学（PSbox）（末期）		22.2	88.8				
	侧面读出电子学（PSbox）（初期）	8	20.3	162.4				
	侧面读出电子学（PSbox）（末期）		22.6	180.8				

4.1.2. PSD 单机外部热控界面约束

PSD 子系统使用载荷热控子系统辐冷板和流体回路完成散热，即热控子系统提供 PSD 子系统所需的流体回路和辐射器的温控界面温度控制。

辐冷板用于给有低温需求的 SiPM 芯片散热；流体回路用于给 PSbox 内的电子学散热。

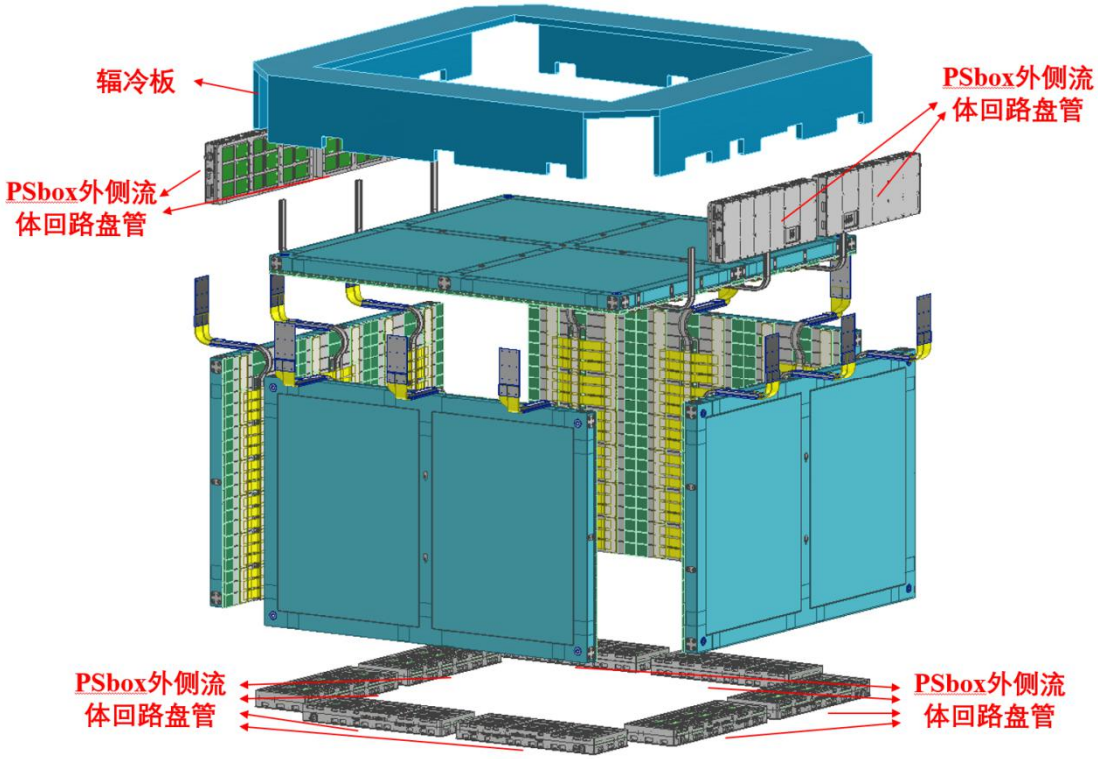


图 4-3 PSD 子系统外部热控配置图

4.1.3. PSD 单机全任务剖面热控内容

HERD 舱外载荷全任务剖面共分为地面测试、发射上行及贮存、大机械臂转运、在轨工作五个阶段。PSD 子系统全任务剖面对于单机热控的相关工作内容和所涉及工作模式描述见下表所示：

表 4-2 PSD 子系统全任务剖面热控工作模式描述

任务剖面	主要事件	热控工作内容和模式描述
发射上行及贮存阶段	发射上行、交会对接、在轨贮存	PSD 子系统不加电
大机械臂转运阶段	大机械臂转运、HERD 与平台对接供电	PSD 子系统不加电
在轨工作阶段	HERD 在轨工作	1）PSD 按照在轨工作模式加电开机，单机热控需保证单机内部温控需求； 2）部分载荷单机在轨维护更换时（有流体回路和热控保温），PSD 在热控子系统提供的热控界面贮存温度基础上，满足单机内部贮存温度需求；

任务剖面	主要事件	热控工作内容和模式描述
		3）PPMU 更换时全部单机无法加电工作； 4）热控电箱更换时，热控子系统无法加电工作， PSD 根据 KPS 电箱保温模式设计进行保温，PSD 在单机内部导热索硬端实施保温加热器。

4.2. 构型与布局

如**错误！未定义书签。**所示，PSD 子系统为 SCD 子系统的内侧，整体位于 HERD 主结构上板面的中央位置，呈中心轴对称分布。PSD 子系统包括 1 台顶面探测器和 4 台侧面探测器，每台探测器为一层蜂窝板探测器组件，其结构同 SCD 子系统耦合一体化设计，五台探测器总体形成五面包裹的布局形式。

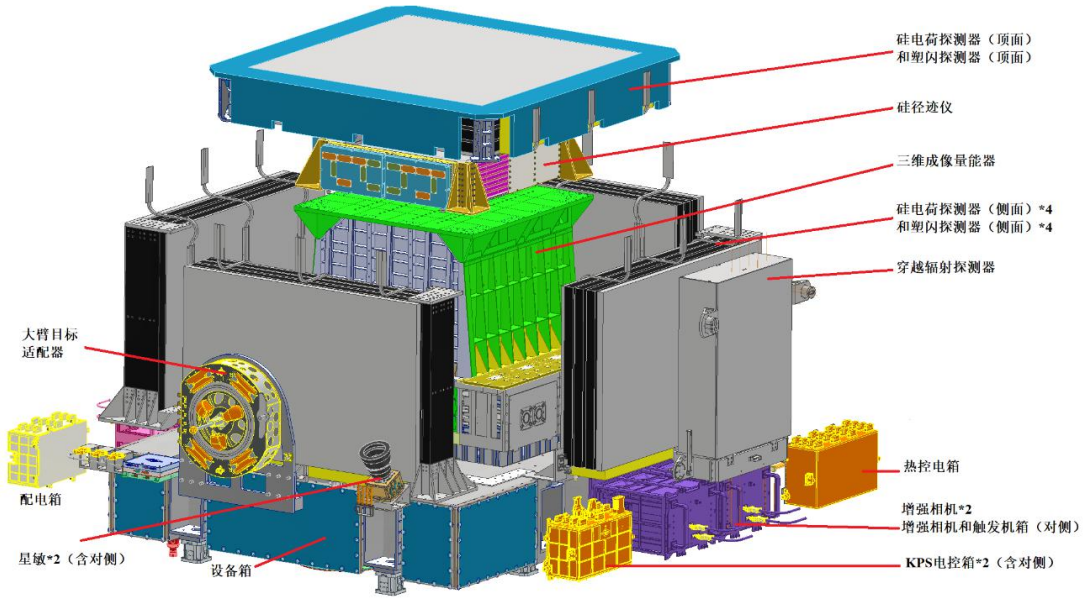


图 4-4PSD 子系统在 HERD 的位置示意图

PSD 子系统的主要结构包括蜂窝板、塑闪探测单元（含 SiPM 读出电子学）、套筒、热管安装支架及热控部件等。蜂窝板是 PSD 探测介质的整体支撑结构，其主要作用是为探测介质提供安装接口，并实现 PSD 探测器的高覆盖率需求；塑闪探测单元包括塑料闪烁体、包裹材料、SiPM 读出电子学，塑料闪烁体为探测介质，利用其高效的光电转换能力探测

粒子和射线等，包裹材料主要有 ESR 反射膜、遮光膜、紧固胶带等，SiPM 读出电子学用于探测数据的读出；套筒为碳纤维薄壁结构，用于将塑闪探测单元安装固定在蜂窝板表面；热管安装支架为热管提供安装接口。

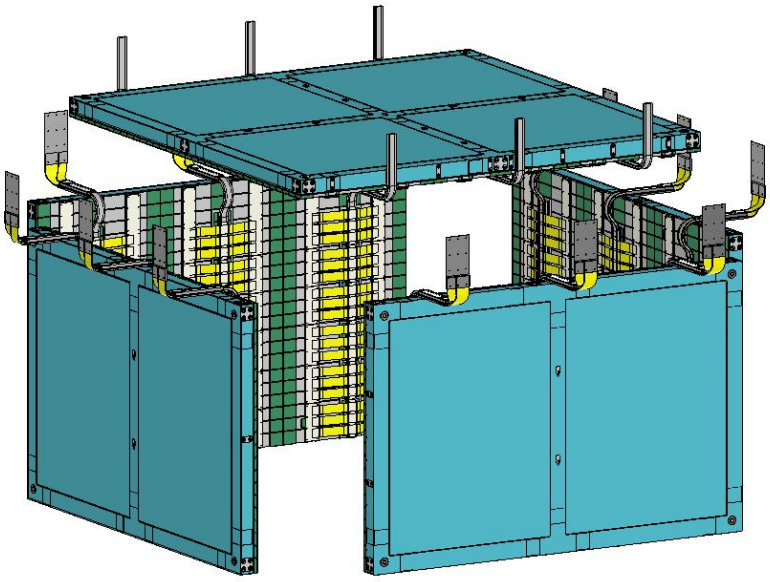


图 4- 5PSD 子系统结构爆炸图

为 PSD 探测器提供探测功能的探测介质是塑闪闪烁体，由 ESR 反射膜、遮光膜、紧固胶带等将塑料闪烁体包裹后、在其表面固定两个 SiPM 读出组件形成一个塑闪探测单元。塑料闪烁体利用其高效的光电转换能力探测粒子和射线等，SiPM 读出电子学用于探测数据的读出。为保证覆盖率，塑闪上不能打孔，所以塑闪单元的安装固定方式均为胶接，通过碳纤维套筒与支撑结构（蜂窝板）进行固定。PSD 子系统内部使用很多胶黏剂，目前暂用 3M 旗下的 Scotch-Weld2216 结构胶，该胶是一款高性能双组份环氧树脂结构胶，属于卫星常用材料选用范围内的原材料，符合 Q/W126.1A-2007《卫星常用金属材料选用范围》、Q/W126.2A-2007《卫星常用非金属材料选用范围的有关要求》和、Q/W 438-93《星上电子产品紧固件优选目录》，目前该胶已在 EP 卫星上成功应用。

考虑到工程实施的可行性与读出电子学设计的合理性，如**错误！未定义书签。**所示，顶面将 9 个塑闪单元划分为一组，侧面将 9 或 12 个塑闪单元划分为一组，每组塑闪的 SiPM 电子学线缆汇总成一个大连接器连接到位于 PSbox 机箱的 PSD 读出电子学。

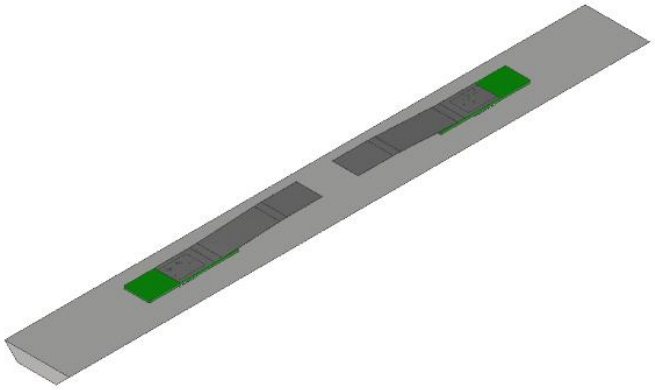


图 4-6塑闪探测单元示意图

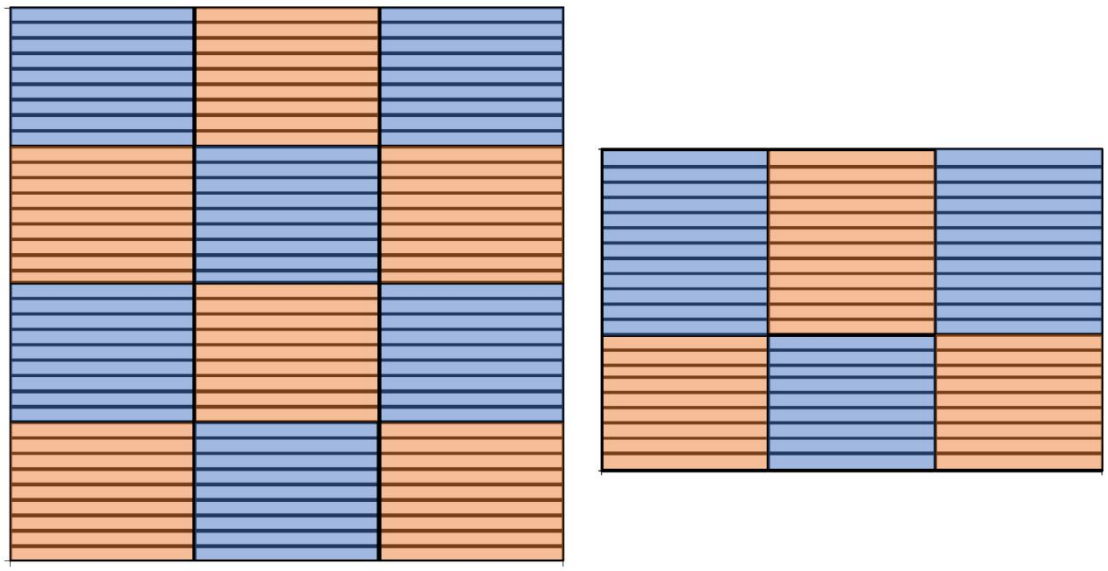


图 4-7塑闪分组示意图

为满足功能、性能指标要求，PSD 塑闪探测单元采用整面单层平铺的方案。根据外包络尺寸约束，同时满足覆盖率要求，PSD 塑闪探测单元整体排布为：顶面塑闪的布局为三列排列，每列包含 36 个塑闪探测单元，总计 108 个，每个塑闪长 504 mm；侧面塑闪的布局也为三列排列，每列包含 21 个塑闪探测单元，总计 63 个，每个塑闪长 464 mm，整个 PSD

探测器共 360 个塑闪探测单元。

塑料闪烁体的厚度均为 10 mm，锐角切除 0.5mm，分组内相邻塑闪间距为 2.5 mm，相邻分组的塑闪间距为 3.5 mm。相邻两列之间的间距是 2.1 mm（地面装配温度为 20℃），考虑到塑料的热膨胀效应，在轨工作之后，到达-30 摄氏度的工作温度时，顶面和侧面每列塑闪的间距分别增大为 4.1 mm 和 4.0 mm。

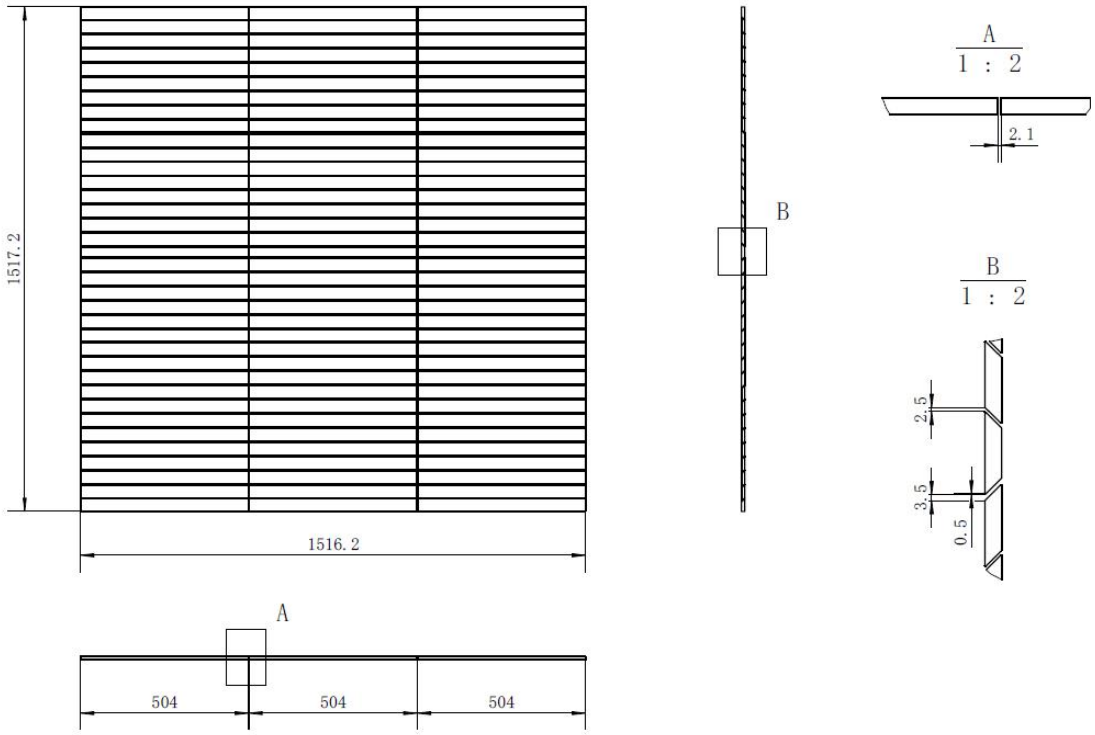


图 4-8顶面塑闪阵列

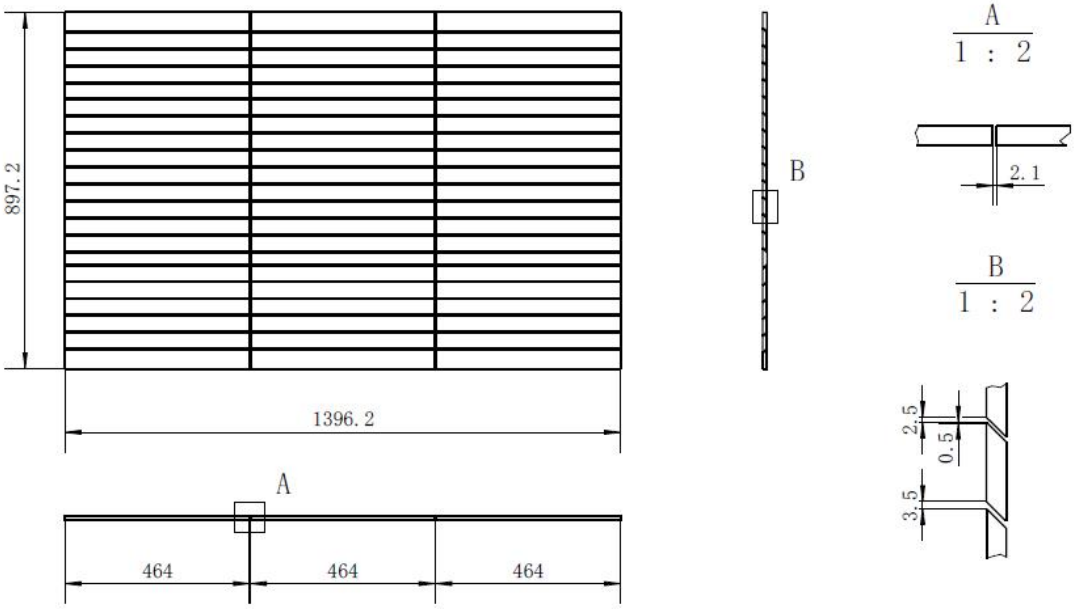


图 4-9侧面塑闪阵列

PSD 子系统的每台探测器主要由蜂窝板表面胶接探测介质组成，主要结构包括蜂窝板、套筒、热管安装支架及热控部件等。蜂窝板是 PSD 探测介质的整体支撑结构，其主要作用是为探测介质提供安装接口，并实现 PSD 探测器的高覆盖率需求；套筒为碳纤维薄壁结构，用于将塑闪探测单元安装固定在蜂窝板表面；热管安装支架为热管提供安装接口。

4.2.1. 蜂窝板

为了减重及减少“死物质”在探测路径上的遮挡，探测介质的承载板采用碳纤维蒙皮铝蜂窝夹层板结构。顶面和侧面的蜂窝板尺寸分别为 1520×1520×50 mm^3 和 1400×880×50 mm^3。与常规蜂窝板的设计不同，通过增加补强框架和层间连接增强蜂窝板的刚度。

蜂窝板主要由碳纤维蒙皮、碳纤维框架、铝蜂窝芯子、金属埋件和表贴件等组成，蒙皮厚度 0.4 mm，由 M55J/氰酸酯碳纤维复合材料铺层而来；框架宽度 60 mm，厚度 49 mm，壁厚 2 mm，也由 M55J/氰酸酯碳纤维复合材料铺层而来；铝蜂窝芯子厚度为 49 mm，选用的规格是 0.03

×5；金属埋件为镁合金材质；表贴件为聚酰亚胺隔热垫。

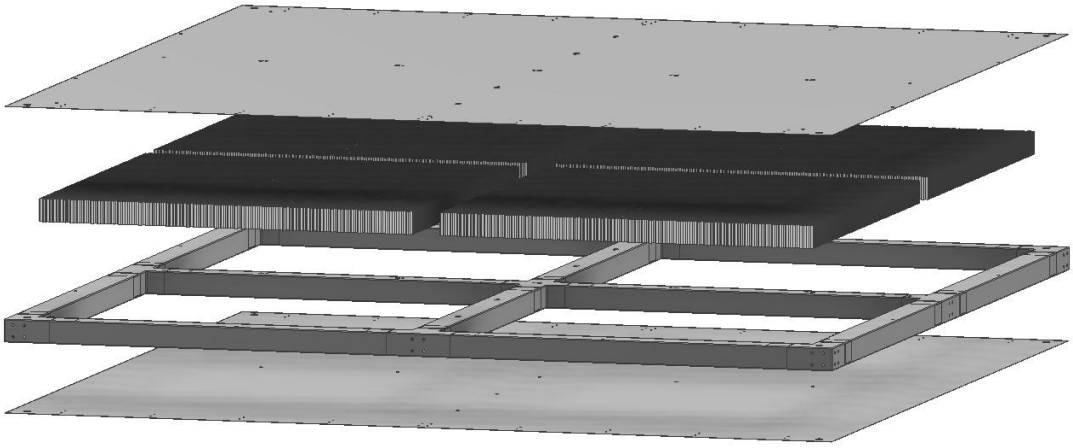


图 4-10PSD 顶面蜂窝板爆炸图

在蜂窝板上粘贴塑闪的位置，设计并布置了厚度为 2mm 的套筒隔热垫，材质选用聚酰亚胺，其主要功能是有效减少 PSD 蜂窝板向塑闪探测单元及热管网络的漏热现象。套筒隔热垫的尺寸与宽套筒的长宽保持一致。鉴于聚酰亚胺与碳纤维材料在热膨胀系数上的差异，隔热垫采用多块拼接的布局方式，以避免因热胀冷缩效应引发隔热垫与蜂窝板蒙皮或塑闪套筒之间的脱胶问题。套筒隔热垫与蜂窝板蒙皮的胶接工艺将由蜂窝板厂家负责实施，采用热固化工艺以确保胶接的牢固性和可靠性。

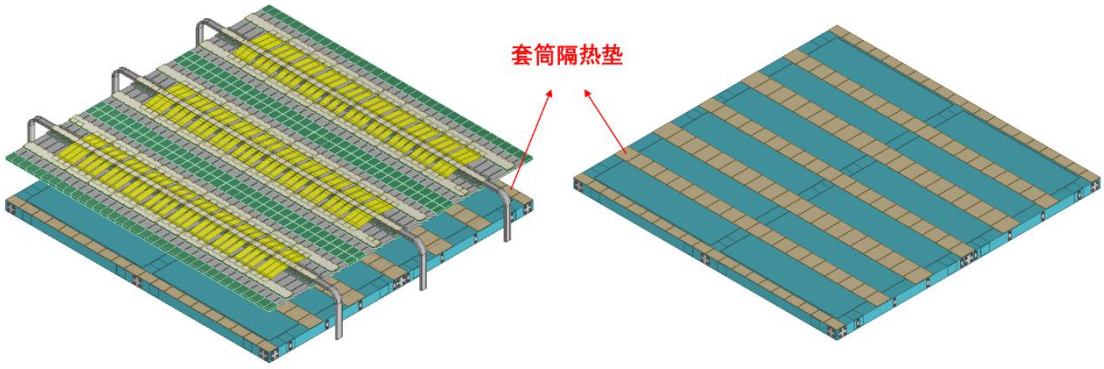


图 4-11套筒隔热垫示意图

4.2.2. 套筒

碳纤维套筒的作用是将塑闪固定到蜂窝板上以及为导热索提供安装

接口。塑闪包裹 ESR 膜、黑胶带等包裹材料之后套在碳纤维套筒内。每列塑闪上设计五组套筒，第一、三、五套筒与蜂窝板的接触面胶接，用于固定塑闪单元，其中位于中部的套筒宽 80 mm，内部涂胶，与塑闪完全绑定，防止塑闪单元整体横向移动；位于两侧的套筒宽 50 mm，内部不涂胶，释放横向自由度以应对塑闪的热膨胀效应。其余两个套筒宽 50 mm，套筒的一侧进行局部加厚，并布置 M2 螺纹埋件，用于螺接固定导热索。这两个套筒内涂胶与塑闪绑定，套筒外与蜂窝板接触面不胶接，保证热膨胀效应下窄套筒随塑闪移动，SiPM 读出电子学组件与塑闪接触界面保持不变。另外，跟塑闪胶接的套筒内尽量涂满胶，保证粘接强度。

套筒的尺寸设计必须精确控制，既不能过大，也不能过小，过大的套筒会导致塑闪与套筒之间的缝隙太大，从而无法有效固定塑闪；而过小的套筒则会使塑闪无法顺利装入。经过前期试验摸索出套筒的内部尺寸设计如下所示，塑闪本体的斜切面与套筒内壁的垂直距离为 0.6 mm，而塑闪本体的上下面与套筒内壁的垂直距离为 0.7 mm，由于塑闪包裹材料接缝处的厚度略大，因此上下面的间距略大于切切面的间距，确保塑闪顺利装入套筒内。另外，相邻分组间的套筒间有 0.1 mm 厚的胶层。

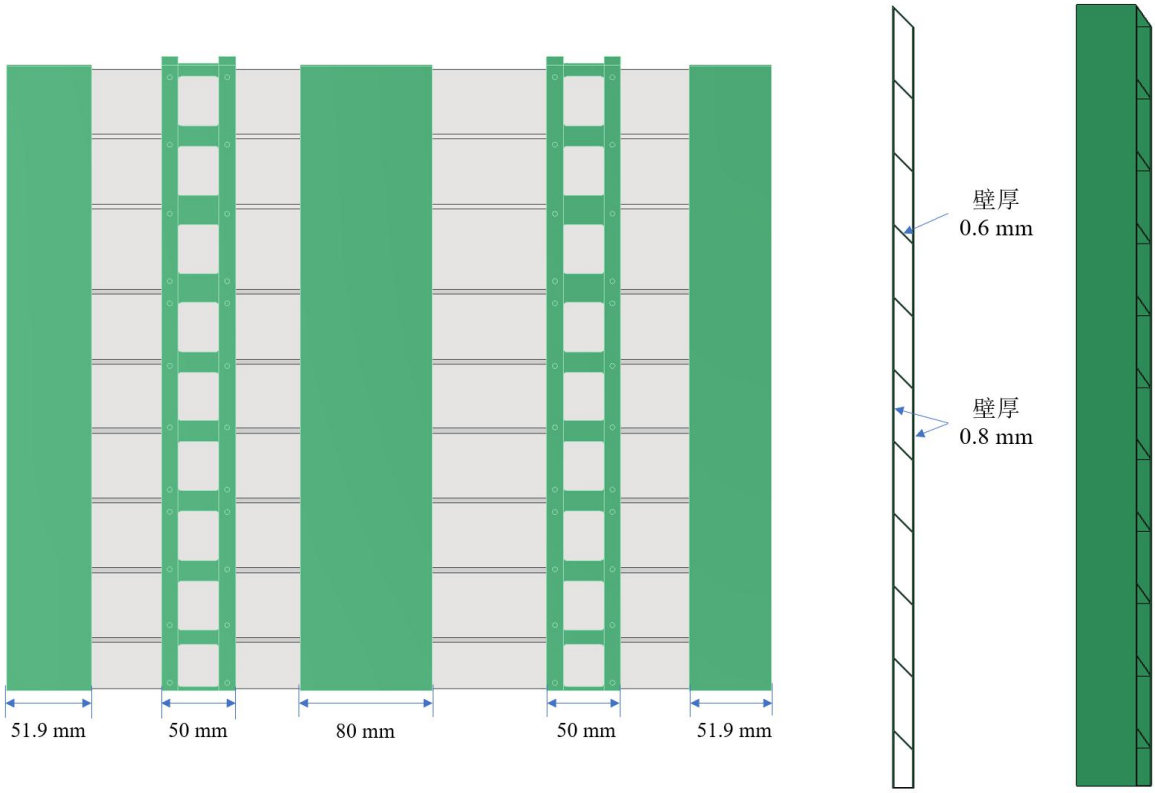


图 4- 12PSD 塑闪套筒示意图

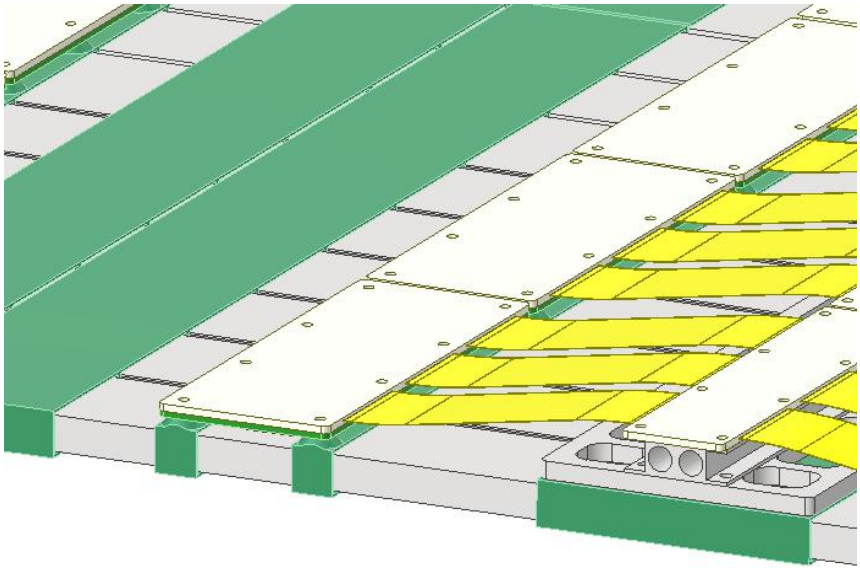


图 4- 13PSD-SiPM 读出组件、导热索与套筒螺接示意图

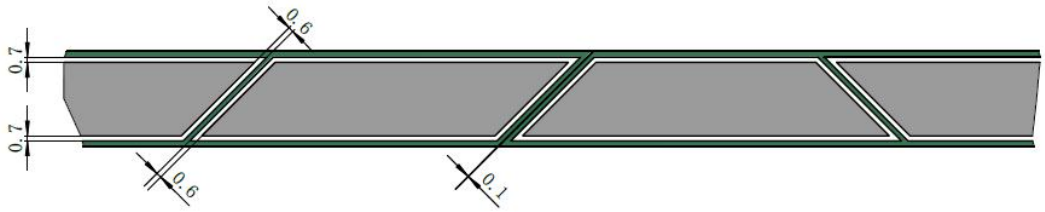


图 4-14套筒尺寸设计的安全余量

4.2.3. 热管安装支架

热管安装支架由玻璃钢复合材料制成，胶接在宽度为 80 mm 的中部套筒上，厚度为 5 mm。其内部镶嵌 M3 螺纹埋件，作用是安装固定 PSD 热管，同时该热管安装支架作为热管与塑闪套筒间的隔热垫。如图 3-15 所示，为了减小塑闪向热管漏热，热管安装支架设计成栅格结构形式，同时在保证胶接强度的前提下尽量降低胶接面积以增加热阻。

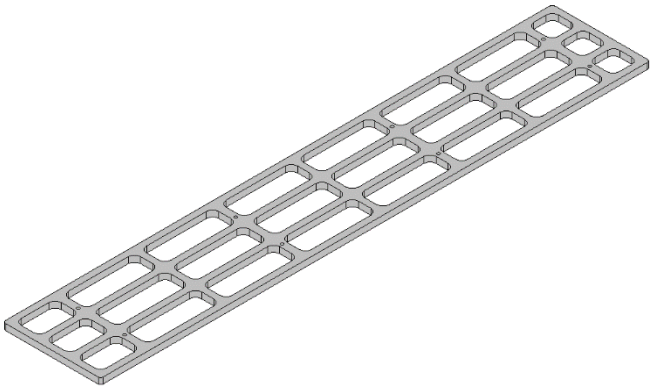


图 4-15热管安装支架示意图

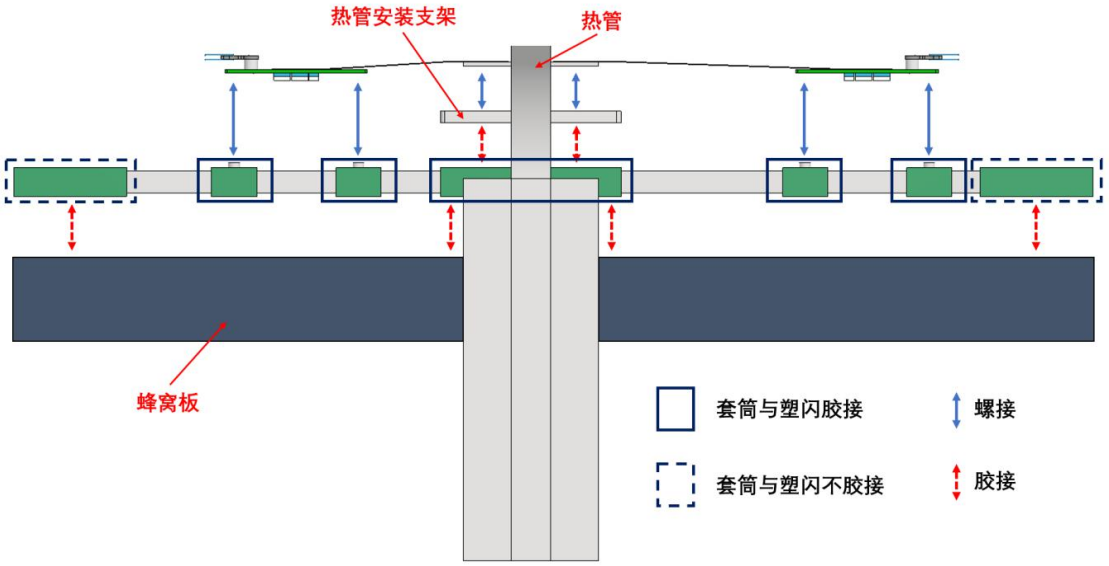


图 4-16 PSD 安装细节关系示意图

4.3. 热控方案设计

4.3.1. 热控方案概述

PSD 子系统采用“辐冷板散热+流体回路散热+三冗余闭环保温”的总体热控架构：SiPM 电子学（寿命末期总功耗 49.7W，工作温度-30~+5℃）热量经 PCB、导热索及热管传导至辐冷板；PSbox 读出电子学（总功耗约 43W）通过镁合金机箱表面贴装流体回路盘管散热；子系统通过隔热垫、隔热膜、多层隔热组件及聚酰亚胺垫片构建双层隔热屏障，配合导热索硬端加热器、KPS 电箱 200W 供电及外部供电三冗余闭环控制，经 9 种工况仿真验证，全寿命周期温度指标均满足要求。

PSD 子系统部组件热物性特性如下表所示

表 4-3 PSD 部组件热物特性表

名称	材料	热导率 W/(m·K)	比热容 J/(kg·K)	密度 kg/m³
热管	1060	~230	900	2700
塑料闪烁体		0.00028 卡/s/(cm²(℃/cm))	/	/
SIPM-PCB	PCB 板	/	/	/
SiPM	复合材料	/	/	/
CFRP 套筒	M40		~712	1810

蜂窝板	CFRP-M55J	X:50、Y:1、Z:1	~712	1910
导热索				
紧固件	不锈钢	/	/	/
导热通道	铜	400	385	8960
石墨烯导热带	石墨烯复合材料	/	/	/
朔闪包裹材料	反射膜 ESR: 3M ESR 65 Auto，厚度 65um， 基材 PET 遮光膜：黑色金手指胶带，厚度 55um，聚酰亚胺			
紧固件	不锈钢	/	/	/

PSD 子系统为 SCD 子系统的内侧，本体尺寸为 1235 mm×1235 mm×1009 mm，PSD 子系统的内包络尺寸为 1225 mm×1225 mm×1004 mm。PSD 载荷子系统的详细质量分布见下表：

表 4-4 PSD 载荷子系统蜂窝板质量统计

部组件	位置	材料	零件质量	数量	部件总质量	质量占比
塑料闪烁体	顶面	塑料	22.1	1	22.1	29.1%
	侧面		11.8	4	47.2	
闪烁体封装	顶面	/	5	1	5	6.1%
	侧面		2.4	4	9.6	
SiPM 读出组件	顶面	/	4.4	1	4.4	6.2%
	侧面		2.6	4	10.4	
CFRP 套筒	顶面	M40	6.1	1	6.1	9.6%
	侧面		4.2	4	16.8	
蜂窝板	顶面	/	20	1	20	26.1%
	侧面		10.5	4	42	
前端电子学	顶面	/	1.5	4	6	7.6%
	侧面		1.5	8	12	
热管	顶面	1060	0.45	6	2.7	3.4%
	侧面		0.45	12	5.4	
导热索	顶面	/	5.2	1	5.2	8.1%
	侧面		3.5	4	14	
多层隔热组件	顶面		0.9	1	0.9	1.2%

	侧面		0.5	4	2	
紧固件	顶面	不锈钢	2	1	2	2.5%
	侧面		1	4	4	
总计					237.8	

4.3.2. 散热设计

PSD 每台探测器的功耗主要由两部分组成，SiPM 电子学功耗和读出电子学功耗。SiPM 电子学采用辐冷板散热，SiPM 电子学与辐冷板之间采用热管和导热索等直接热导通；读出电子学采用流体回路散热，读出电子学安装在 PSbox 机箱内，机箱表面贴流体回路盘管直接对其散热。

4.3.2.1. 功耗分布

PSD 的功耗分为两个部分，分别是前端 SiPM 电子学功耗和后端常规电子学功耗。SiPM 电子学的功耗与在轨时间有关，入轨初期其功耗接近 0，随着在轨时长增加直至寿命末期 SiPM 的总功耗逐步增加至 49.7W（顶面 15.2W，4 侧面共功耗 34.5W）。

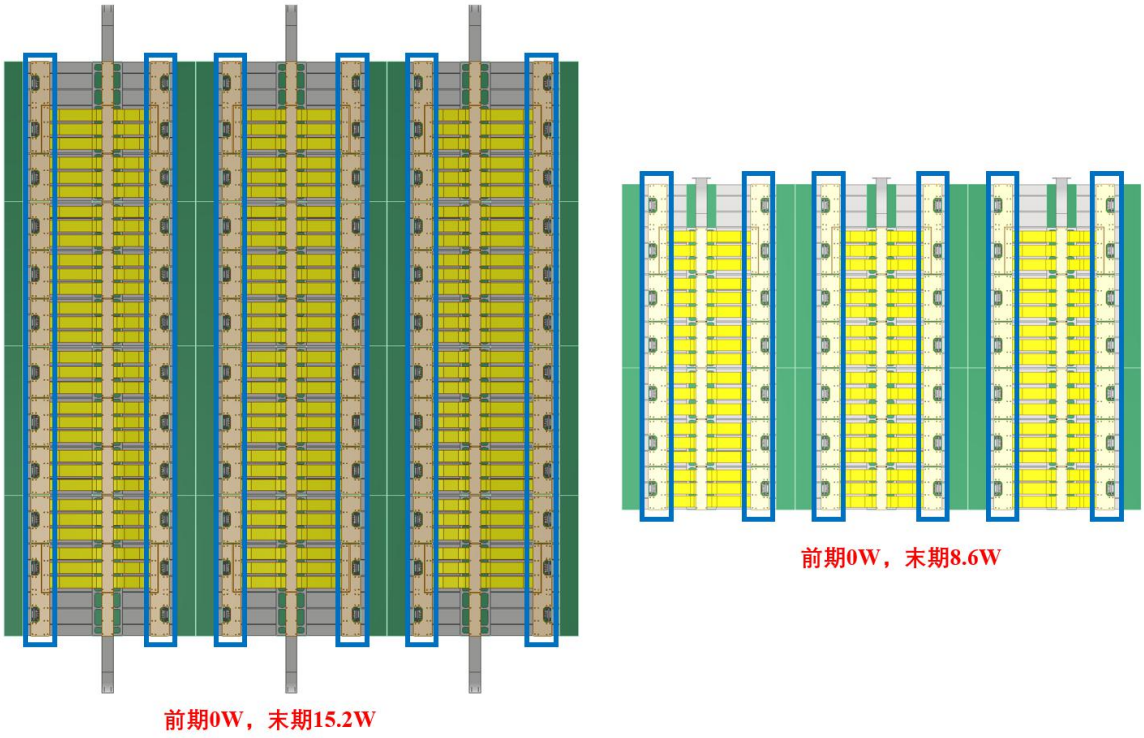


图 4-17 SiPM 电子学功耗分布

PSD 的读出电子学为常规电子学，安装在 PSbox 机箱中，采用流体

回路进行散热。另外，除了 PSD 的读出电子学外，PSbox 机箱内还安装了 PSD 的读出电子学。一共有 12 个 PSbox 机箱，每个机箱的功耗一致，初期总功耗约 38.87W，其中 SCD 18.69W，PSD 20.18W；末期总功耗约 43.41W，其中 SCD 18.69W，PSD 24.72W。

4.3.2.2. SiPM 电子学散热设计

SiPM 芯片的工作温度指标（-30~+3℃）偏低，流体管路（3~8℃）无法满足需求，为了保证 SiPM 的低温工作环境，热控子系统和 PSD 子系统耦合设计了辐冷板和热管网络，专门用于给 SiPM 电子学散热。SiPM 电子学的导热路径如下图所示，SiPM 芯片的热量首先穿过 PCB 板，再由石墨导热索传至热管，由热管将热量带至辐冷板排散至深冷空间中，辐冷板与热管网络如下图所示。与顶面 SiPM 的散热路径稍微有些区别，侧面 SiPM 的散热路径中，热管与辐冷板之间增加了石墨导热索。

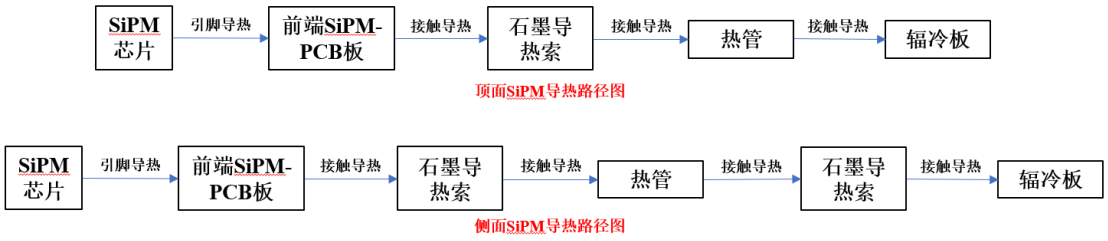


图 4- 18 SiPM 电子学导热路径图

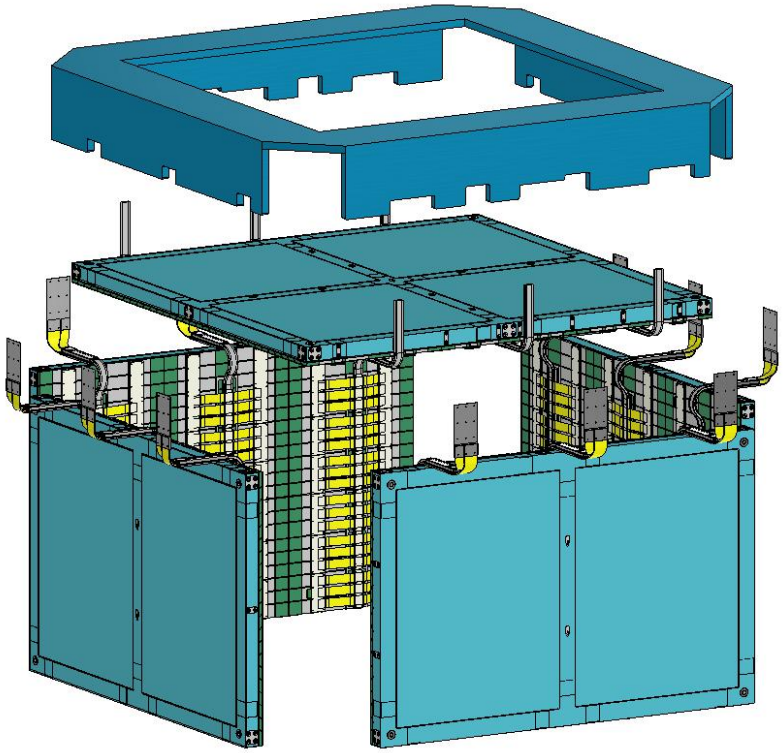


图 4-19 辐冷板与热管网络示意图

A、PCB 设计

针对 PSD 子系统 SiPM 芯片分布广、热流密度低的特点，采用热管加石墨导热索方案：通过热管网实现分布式热量收集，结合高导热石墨导热索增强横向传热，最终由高发射率辐冷板将热量定向排散至深冷空间。

为优化与导热索的对应关系，提升工程实施的可操作性并降低工作量，采用将相邻三块 SiPM 电子学 PCB 集成至单块 PCB 的设计方案。在该集成 PCB 上，仅需配置一个用于数据读出的连接器。此设计不仅实现了整体重量的减量化，同时显著减少了后期连接器插拔操作的工作量。同时，为增强 PCB 的 Z 向导热性能，并有效降低 SiPM 芯片与导热索之间的温差，PCB 设计中采用了贯穿式铜柱结构，并在 PCB 表面实施大面积覆铜处理。该设计显著提升了热传导效率，确保热量能够均匀且高效地从 SiPM 芯片传递至导热索。

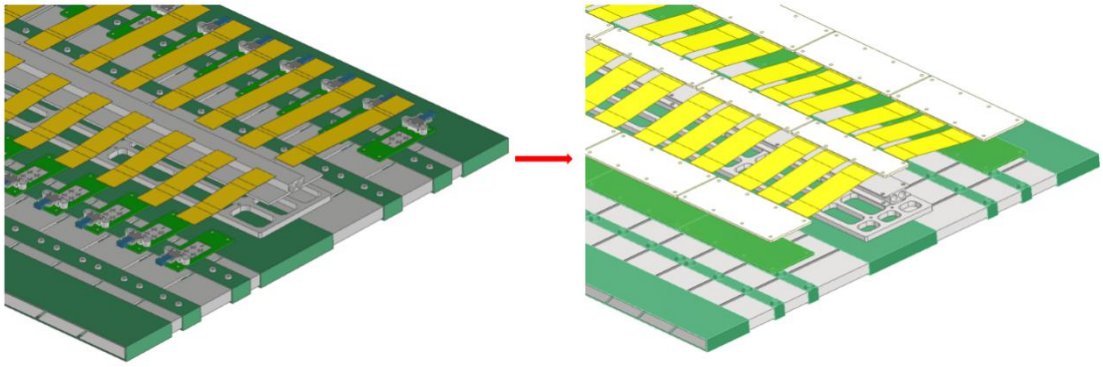


图 4-20 SiPM 读出组件合并示意图

由于 SiPM 芯片和石墨导热索分别贴在 PCB 板的两侧，如下图所示，SiPM-PCB 板设计了贯穿 PCB 板的 Z 向导热通道，强化 PCB 板的 Z 向导热能力，保证 SiPM 芯片与导热带的热导通。

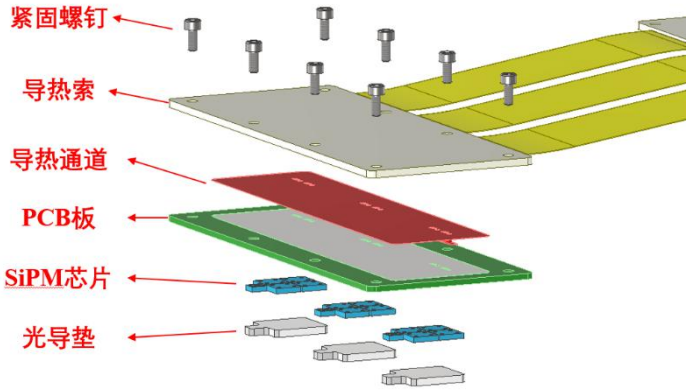


图 4-21 前端 SiPM 读出组件爆炸图

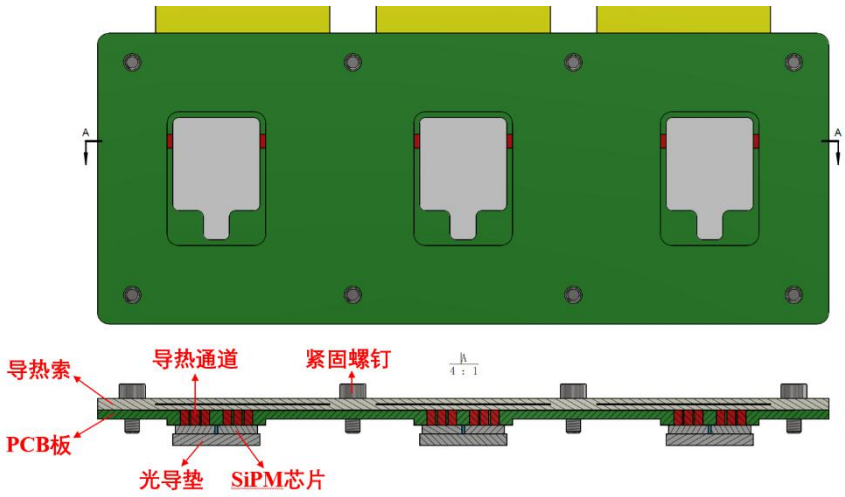


图 4-22 前端 SiPM 读出组件剖视图

B、导热索设计

为了进一步降低传热路径上的热阻，单机内部设计了石墨导热索用于连接 SiPM 读出电子学组件和热管，保证 SiPM 电子学处于其所要

求的低温工作温度范围。如下图所示，石墨导热索采取“硬－软－硬－软－硬”的设计，由三块 2mm 厚的金属板和若干石墨膜导热带焊接而成，其中，两侧铝板为导热索的热端，直接贴在 SiPM 电子学板上收集热量，中部铝板为导热索的冷端，直接贴在热管上，将导热索收集的热量传至热管。导热索的安装方式为螺钉连接。

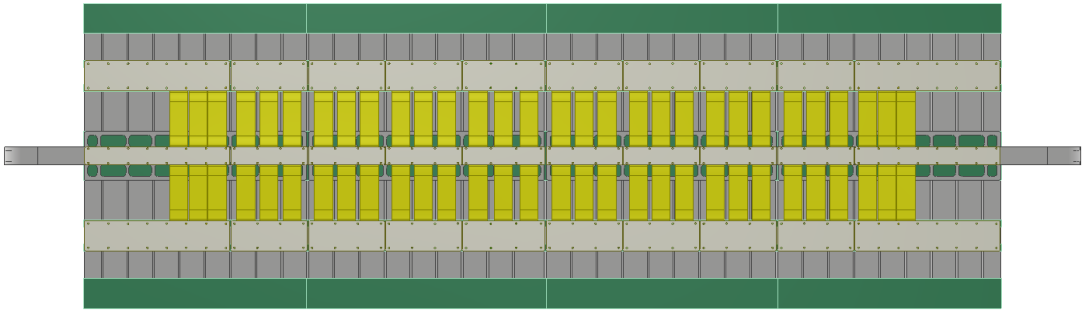


图 4-23 热管与 SiPM 读出电子学之间的导热索位置示意图

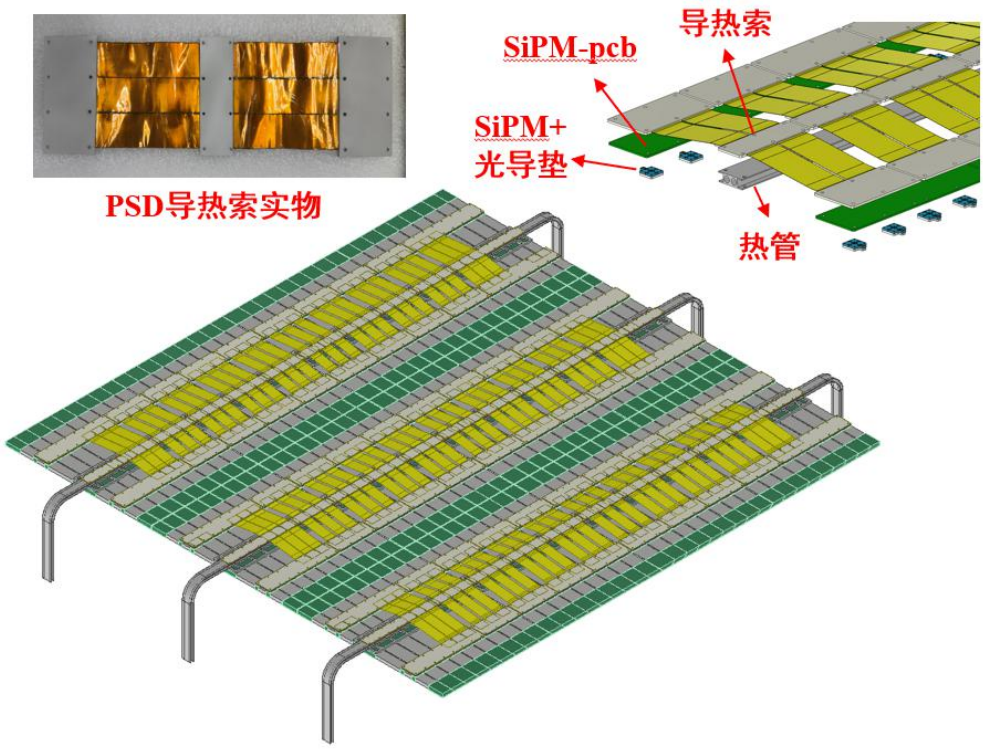


图 4-24 PSD 导热索示意图

该石墨导热索由北京化工大学团队研制，导热索柔性部分为 32 层石墨膜和 2 层铜皮，铜皮的作用是为了保护石墨膜。将 34 层柔性膜整体钎焊进铝质薄板的长扁孔内，焊接完成后，再用聚酰亚胺胶带将柔性部分封装，并留透气孔，透气孔的位置位于靠近铝板接头的位置。北化工团

队拥有自主建设的导热索专业化生产基地，具备为 PSD、SCD 子系统提供批量化导热索产品的供货能力，并建立了完整的质量管控体系，通过标准化生产流程和严格的质量检测程序，确保产品性能参数的一致性满足项目要求。

石墨导热索的具体实施工艺为：导热索的两个金属端部通常采用螺钉和硅脂、导热胶或导热垫的方式与仪器设备的发热端和制冷端连接使用，最后螺钉连接部分用 GD414 硅橡胶密封处理。该导热索能够承受零下 196℃（77k）-120℃的交变温度的冲击，北化工团队做了大量的热冲击和热真空试验（通常-40℃到 120℃），都已证明这一点。自从 2018 年 7 月份北化工碳铝导热索随着高分十一号卫星的星敏感器发射成功以来，已经在轨运行了 7 年，至今仍在发挥着高效传热的作用。之后该产品已服务应用于高分十一号后续的 02/03/04/05 星、高分七号、高分十三、高分十四、实践六号、实践二十二号、试验六号、北京三号、高景三号，楚天一号、风云三号 F 星、“羲和号”、遥感四十一、嫦娥六号等 50 余个航天器及其载荷。此外，该碳基柔性导热索材料和组件产品全部是由金属和 100%碳元素构成的石墨材料组成，不含任何的胶黏剂等易老化成分。并且经过固定两端刚性金属端，进行了数千次的 90°弯折验证试验，其性能和外观弯折前后均无变化，寿命可达 15 年以上。

C、热管设计

热管初步选型为 30×9.1 工字形双孔热管，该热管的常温最大传热能力为 208 W·m。在 PSD 子系统中，热管的布局如下图所示，顶面每列配备了两根热管进行散热，共计 6 根热管；侧面单列则使用一根热管散热，四个侧面共 12 根热管，总计 PSD 子系统有 18 根热管。其中，顶面热管的冷端直接贴在辐冷板上进行换热；但是如果侧面热管的冷端也直接贴在辐冷板表面的话，则需要保证极高的安装精度才有可能使顶面和侧面的热管冷端与同一块辐冷板完美贴合，显然，对于这么庞大复杂的

结构系统，很难保证极高的安装精度，况且 30×10 工字形双孔热管较硬，其原位矫形也比较难，所以设计了石墨导热索将侧面热管冷端与辐冷板之间建立热导通关系。

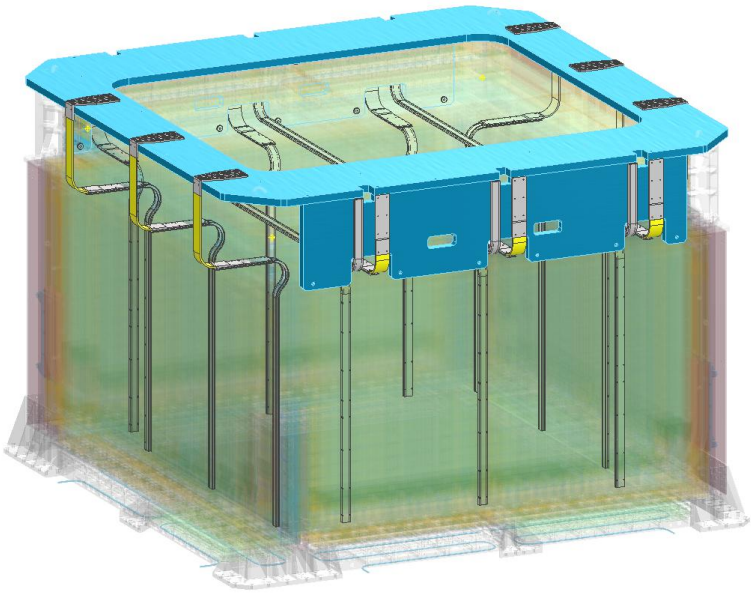


图 4- 25 PSD 热管分布图

在当前热控设计状态下，考虑接触、螺钉带来的导热漏热及辐射漏热等，其他子系统向 PSD 子系统漏热约 120W，加上 SiPM 自身的热耗，计算得出在使用寿命末期时，顶面每根热管需散热约 8.8W，侧面每根热管散热约 9.9W。当前的热管选型满足该散热需求。

PSD 子系统采用三维立体分布的多热管架构，在地面重力环境下存在个别热管因工质回流受限导致启动失效的风险。为此后续将开展专项热管启动性能测试，对失效热管采用局部加热法进行补充验证，并通过数值仿真和热流密度测试等手段评估导热链路合理性。

4.3.2.3. 读出电子学散热设计

PSbox 机箱隔热安装在蜂窝板侧面位置，其结构为镁合金金属笼屉式结构。顶面 PSbox 机箱分布在蜂窝板结构的迎背风面；侧面 PSbox 机箱均分布在蜂窝板结构的底部。如下图所示，机箱内部功耗大的 DC-DC 模块等一类器件直接安装在靠近盘管的金属框架上，如无法安装到金属结

构的器件则使用导热铜箔等建立和外壳的导热路径，PCB 和结构安装接触面做金属化处理降低其安装热阻，电子学元器件的导热路径如下图所示。PSbox 机箱屏蔽盖金属结构与流体回路盘管导热安装，其热量由流体回路收集后排散。

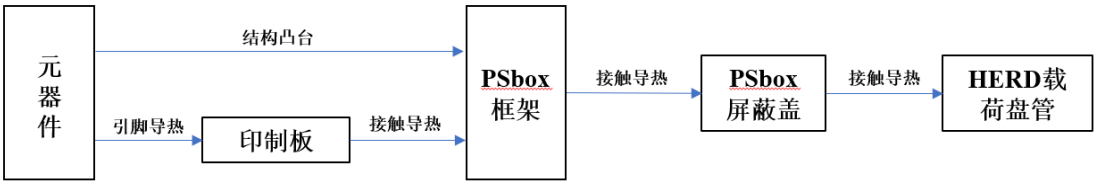


图 4-26 PSbox 机箱内元器件的散热路径图

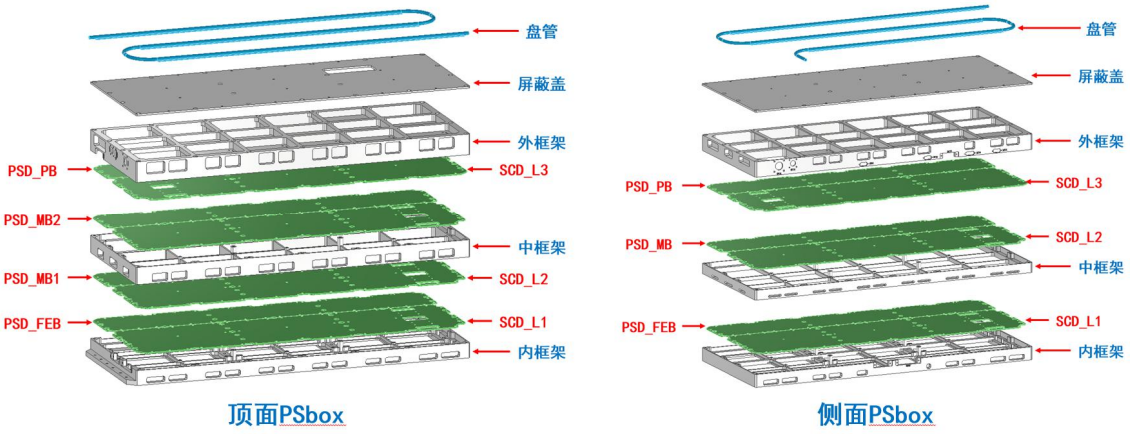


图 4-27 PSbox 机箱内高功耗元器件与结构安装示意图

4.3.3. 隔热设计

辐冷板的作用是专门为 SiPM 电子学散热，保证其低温需求。为了减少其他高温区域向 SiPM 电子学、热管网络及辐冷板漏热，PSD 子系统内部设计了如下隔热措施：

1）热管与塑闪套筒之间增加玻璃钢隔热垫，并在保证胶接强度的前提下尽量降低胶接面积以增加热阻；

2）PSD 蜂窝板侧边及面向 SCD 这一侧的表面贴低红外发射率薄膜，减少 SCD 探测器及 PSbox 机箱向 PSD 蜂窝板的辐射漏热；

3）PSD 子系统内侧及 CALO/PD、STK 子系统外侧布置多层隔热组件，减少 CALO/PD、STK 子系统向 PSD 子系统的辐射漏热；

4）PSD 蜂窝板的安装及层间连接界面增加聚酰亚胺隔热垫，减少其他结构向 PSD 蜂窝板的导热漏热。

4.3.4. 保温设计

PSD 保温设计拟在 SiPM 电路板背面的导热索硬端胶接加热器，同时配合热敏电阻测温实现 PSD 的闭环保温。考虑到热控子系统保温和单机自行保温设计相结合以简化整体保温设计方案，两者保温可使用同位备份的方式布置加热器。保温加热的具体功率需求见下述 PSD&SCD 热仿真章节。

在热控子系统故障无法维持载荷温度时，KPS 电箱开启保温模式，为导热索硬端加热器供电保温。两台 KPS 电箱初步设计为前端探测器提供共 200W 保温功率。

在 PPMU 故障无法为 HERD 供电时，热控子系统切外部供电进行载荷保温，此时热控子系统同样为导热索硬端加热器供电保温，且 PSD 载荷内部布置测温点由热控子系统进行保温温度闭环控制。

4.4. PSD 结构材料补充说明

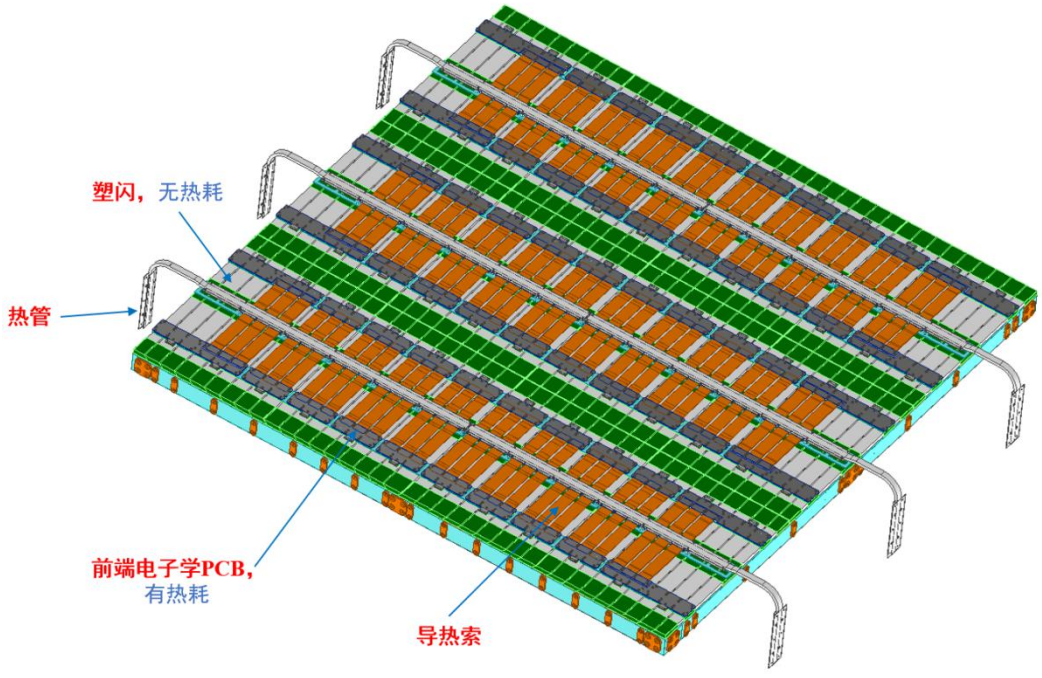


图 4-28 PSD 热耗分布示意图

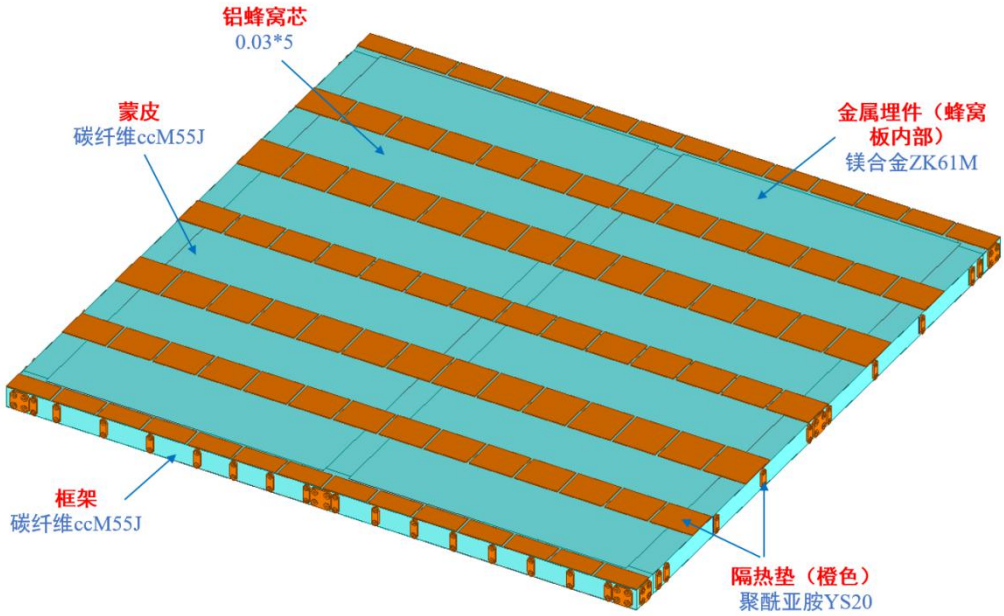


图 4-29 蜂窝板结构示意图

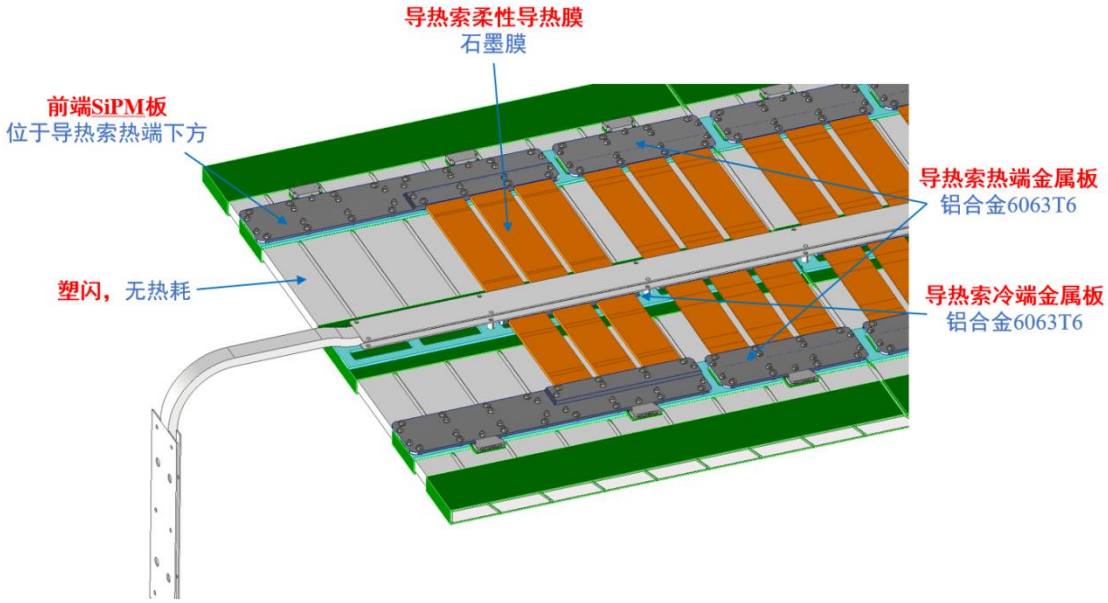


图 4-30 PSD 导热索局部示意图

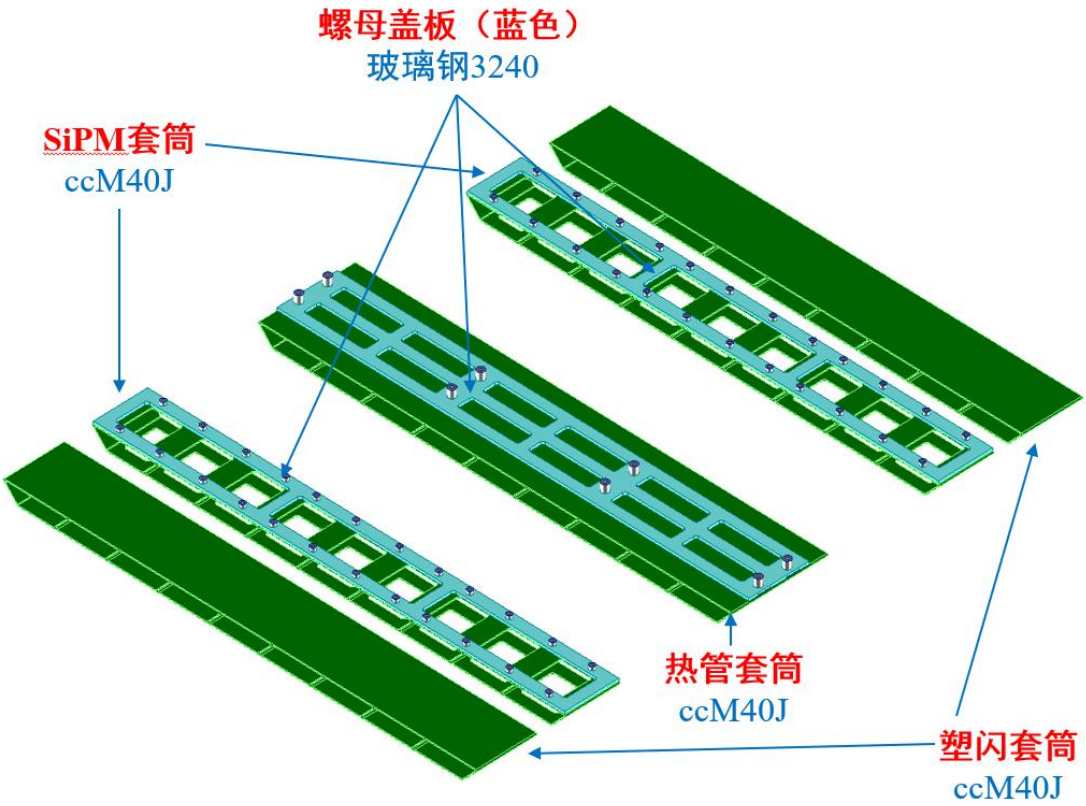


图 4-31 套筒示意图

5. STK 热控设计

5.1. 任务需求和设计约束

5.1.1. STK 单机外部热环境设计约束

STK 单机安装在侧面 PSD&SCD 顶部，外部为 PSD&SCD 的 5 台设备，故 STK 完全被遮挡在 HERD 内部，不面对外部冷板、各类外热流对 STK 无直接影响。

HERD 整体热设计时，为了防止不同单机之间的辐射换热耦合，STK 单机外表面、CALO/PD 外表面、PSD 内表面（面向 STK 一侧）均包覆多层隔热组件以降低辐射换热；STK 与侧面 PSD&SCD 安装界面使用非金属隔热垫和钛合金螺钉进行隔热安装降低两者之间的接触换热。

5.1.2. STK 单机热控界面设计约束

STK 单机使用载荷热控子系统流体回路完成散热，即热控子系统提供 STK 单机所需的冷板温控界面温度控制。热控子系统为 STK 设计有两

路流体支路，两路支路上游均为前端电子学，下游均为 TRB 机箱，如此能够保证温度较低的流体均先流入前端电子学冷板后再进入功耗较大且低温需求较低的 TRB 机箱。

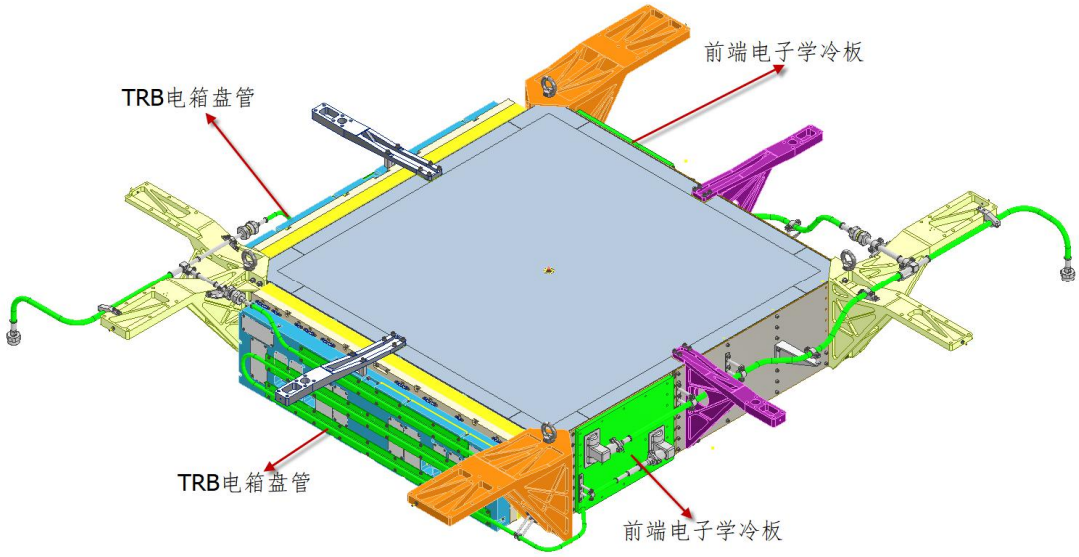


图 5-1 STK 单机外部热控配置图

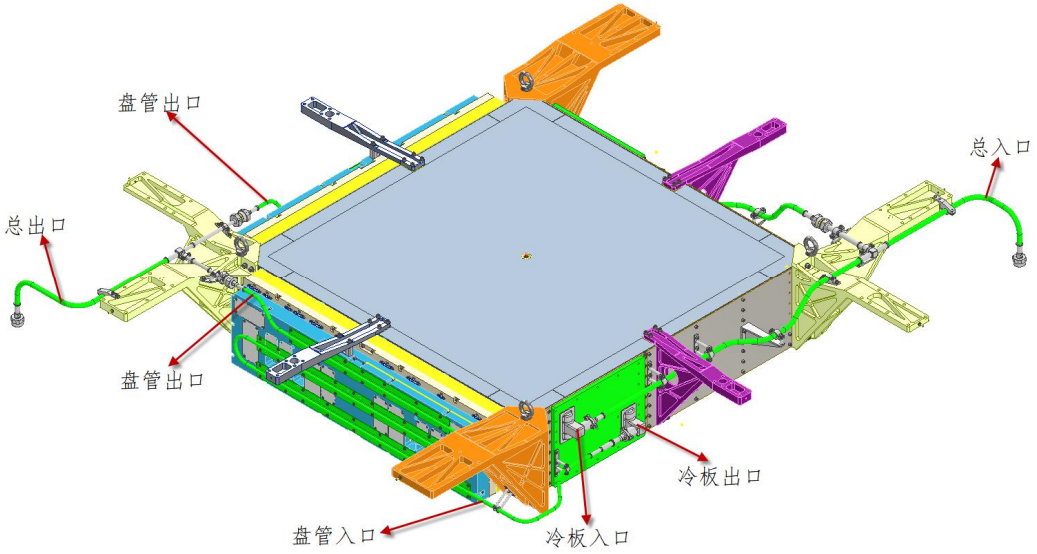


图 5-2 STK 单机流体回路支路进出口设计示意图

TRB 机箱的盘管为圆管带翅片的结构形式，翅片加工安装通孔使用螺接+胶接的形式安装在 TRB 机箱的最外层框架，直接建立 TRB 和流体回路之间的导热路径。盘管设计时可结合 TRB 机箱的局部热斑设计布局加强导热的翅片结构。TRB 盘管材料为铝合金，和 TRB 结构框架镁合金

材料的线膨胀系数相接近，但为了避免因线膨胀系数不一致可能导致盘管受力，将盘管上安装通孔设计为更大直径，以便适当释放盘管的变形量。TRB 机箱流体回路盘管安装设计示意见下图所示：

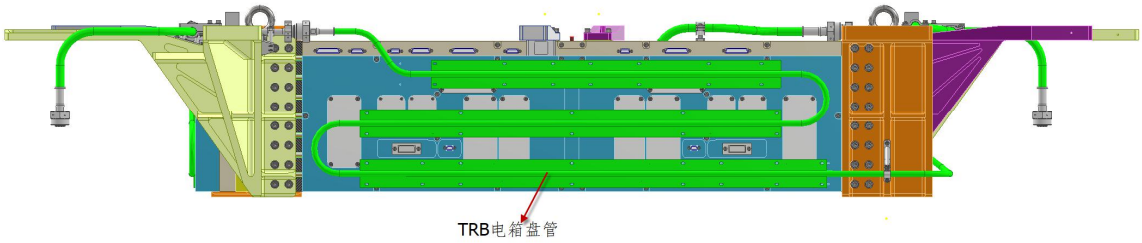


图 5-3　STK 单机 TRB 流体盘管设计示意图

5.1.3. STK 单机全任务剖面热控设计输入

STK 单机全任务剖面对于单机热控的相关工作内容和所涉及工作模式描述见下表所示：

表 5-1　STK 单机全任务剖面热控工作模式描述

任务剖面	主要事件	热控工作内容和模式描述
发射上行及贮存阶段	发射上行、单舱自主运行、交会对接、在轨贮存	STK 单机不加电
大机械臂转运阶段	大机械臂转运、HERD 与平台对接供电	STK 单机不加电
在轨工作阶段	HERD 在轨工作	1）STK 单机按照在轨工作模式加电开机，单机热控需保证单机内部温控满足在轨工作需求； 2）部分载荷单机在轨维护更换时（有流体回路和热控保温），STK 在热控子系统提供的热控界面贮存温度基础上，满足单机内部贮存温度需求； 3）PPMU 更换时全部单机无法加电工作； 4）热控电箱更换时，热控子系统无法加电工作，硅迳迹仪子系统由外部单机保证环境温度。

5.1.4. STK 单机热控功能及指标要求

STK 单机热控需满足以下主要功能要求：

1）保证 STK 单机内各 LADDER 的温度满足其工作温度范围要求、

温度稳定性要求及存储温度范围要求；

2）保证 STK 单机两台 TRB 电子学的温度满足在轨 I 级降额要求。

表 5-2 STK 功耗分布及温控要求

部组件	数量	单组件功耗（W）	总功耗（W）	工作温度（℃）
前端电子学	14（热管组数）	2.937	41.118	-20~30
Ladder-硅片	896 片	0	0	-20~24
TRB	2	39.94	79.88	I 级降额

5.2. STK 热设计方案

5.2.1. 结构材料

由于 HERD 整体科学观测的需求，STK 主要结构材料均选用复合材料，故 STK 的热控设计无法使用主要结构材料导热和均温，必须额外设计导热路径完成功耗的收集和定向输送。STK 单机核心组成部组件包含：8 层碳纤维蒙皮蜂窝板组件、2 套 TRB 电箱、8 件安装结构、2 件冷板过渡板、2 件侧面遮光板、管路冷板及各类卡箍、紧固件等。

表 5-4 STK 主要构成部组件材料

序号	组成部分	数量	材料	备注
1	碳纤维蒙皮蜂窝板组件	8 层	蒙皮使用 CCM55J/氰酸酯，框架使用 CCM40J/氰酸酯，4×0.04 铝蜂窝，ladder 为柔性板+硅片+前端电子学 PCB	ladder 胶接于蒙皮之上，前端电子学 PCB 有热耗
2	TRB 电箱	2 套	镁合金 ZK61M	内含电子学 PCB，有热耗，与盘管导热接触安装
3	安装结构	8 件	铝合金 7A09T6	
4	贯穿螺杆	1 件	钛合金 TC4R	
5	冷板过渡板	2 件	铝合金 6063T6	与冷板导热接触安装
6	侧面遮光板	2 件	CCM40J/氰酸酯	
7	管路冷板/盘管	4 套	铝合金	整机热边界，乙方需生产地面试验配套产品
8	线缆管路卡箍	若干	镁合金 ZK61M	
9	配套紧固件	若干	钛合金/不锈钢	

5.2.2. STK 单机重量及包络尺寸

STK 单机各主要部组件及整机重量统计见下表所示，其中 8 层探测器组件中共包括 28 根热管，总重约 1Kg。

表 6-5 STK 单机重量统计表

序号	部件名称	数量	材料	单重 Kg	总重 Kg
1	顶部探测器组件	1	蜂窝板+ladder+热管	7	7
2	通用层探测器组件	3	蜂窝板+ladder+热管	8.5	25.5
3	钨板层探测器组件	3	蜂窝板+ladder+热管	10.8	32.4
4	底部探测器组件	1	蜂窝板+ladder+热管	6.9	6.9
5	TRB12 电子学组件	1	镁合金+电子学	10.5	10.5
6	TRB34 电子学组件	1	镁合金+电子学	10.5	10.5
7	侧面整体连接	2	CFRP	0.325	0.65
8	单角脚座	2	铝合金	3.375	6.75
9	双角脚座	2	铝合金	3.235	6.47
10	安装条板	4	铝合金	0.575	2.3
11	冷板过渡板	2	铝合金	0.535	1.07
12	贯穿螺杆	1	钛合金	0.02	0.02
13	管路卡箍	16	铝合金	0.03	0.48
14	标准件+胶黏剂	1	不锈钢/钛合金	2	2
15	加热器、多层、热敏等及热控线缆	1	/	2.5	2.5
16	总计				115

STK 单机机械包络外形图见下图所示：

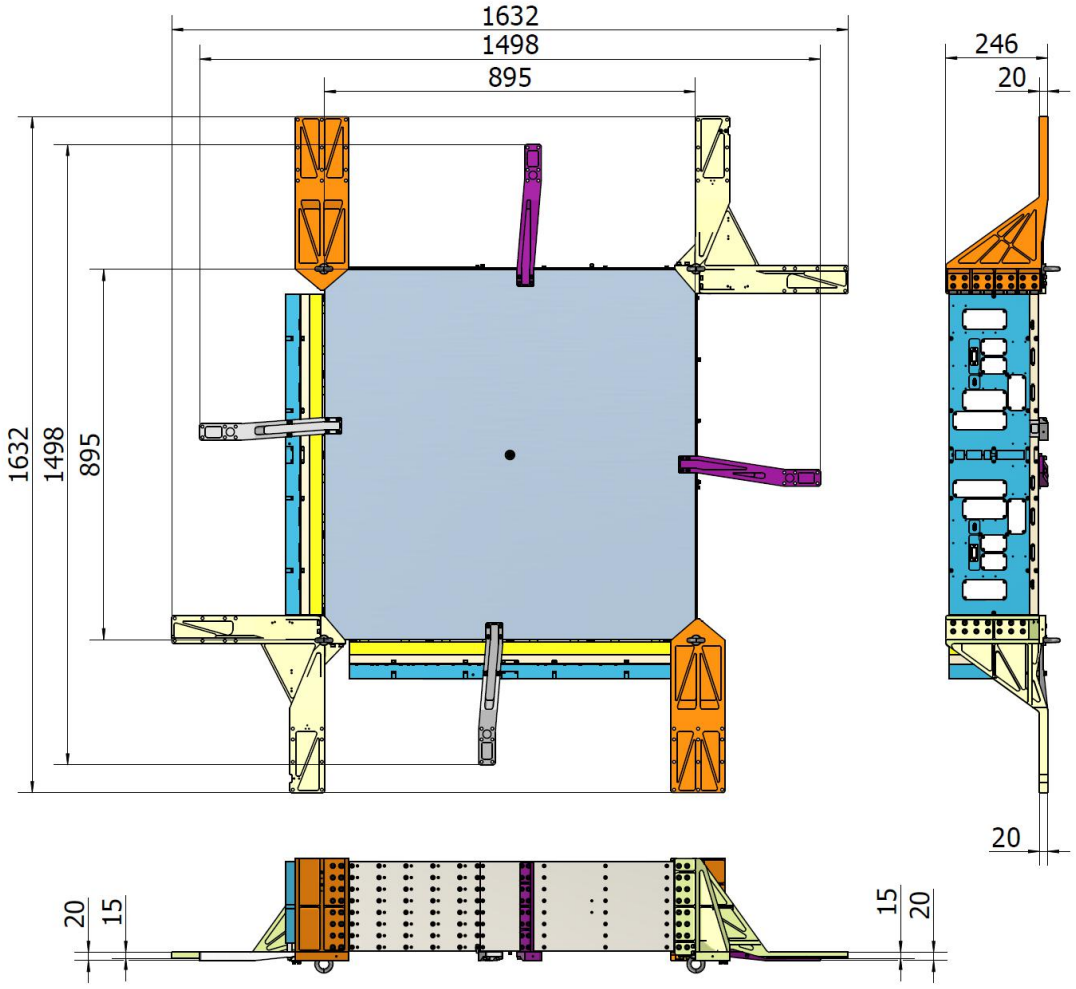


图 5-4 STK 单机尺寸图（未含多层）

5.2.3. STK 功耗分布

STK 单机共包括 8 层蜂窝板结构，上下两层蜂窝板单面胶接 ladder，其余 6 大层蜂窝板其上下表面均胶接有 ladder，每一条 ladder 由前端电子学板和硅探测器组成。8 层蜂窝板侧面设计有两台电子学箱(TRB)，其位置同 ladder 上前端电子学板位置同侧，并通过柔性线缆及连接器实现 TRB 和前端电子学板的电信号连接。

STK 的热源有 2 种：探测器模块(Ladder)的前端电子学和电子学机箱(TRB)。其中，电子学机箱(TRB)是通用的电子学系统，对热控的要求较低，总功耗 79.88 W，其外壳为镁合金金属结构并与蜂窝板框架隔热安装。前端电子学与探测器相连，它的热量会传导到探测器，总功耗为 41.12 W

共使用两块冷板导出。

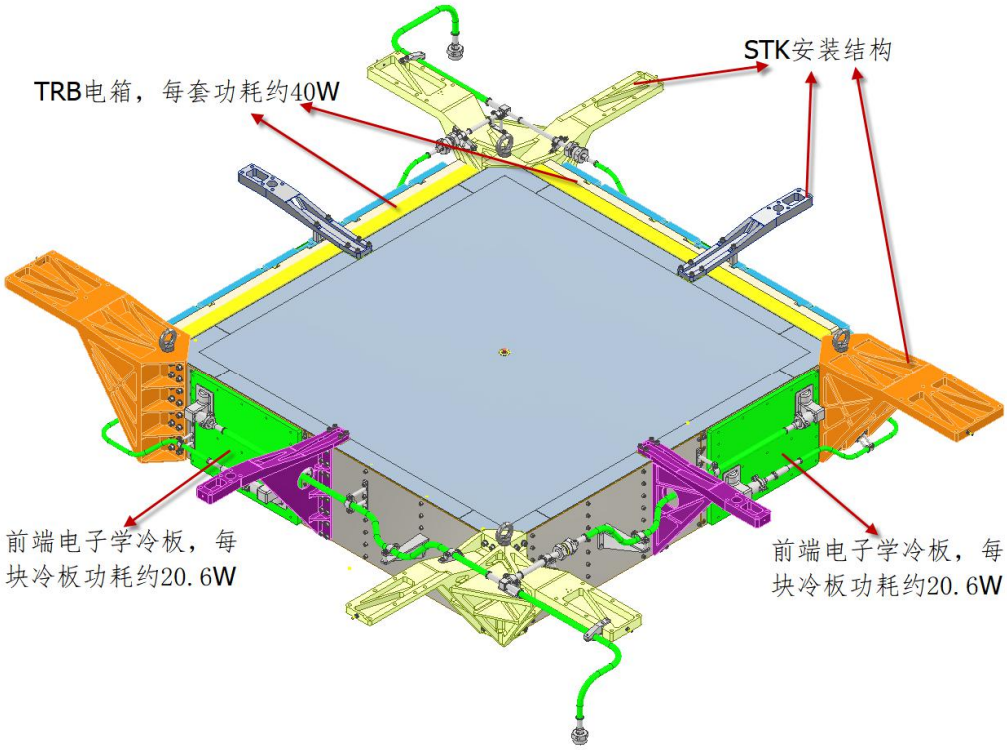


图 5-5 STK 单机总体热控示意图

5.2.4. 蜂窝板导热及隔热设计

STK 单机 8 层碳纤维蒙皮蜂窝板高温固化成型后在前端电子学热管和冷板相连接的位置胶接紫铜角件，用于导热连接热管和流体回路冷板，影响蜂窝板框架位置预埋金属埋件。紫铜角件与热管连接部分厚度为 1.5mm，与冷板连接厚度为 2mm，胶接后加工安装螺纹孔。

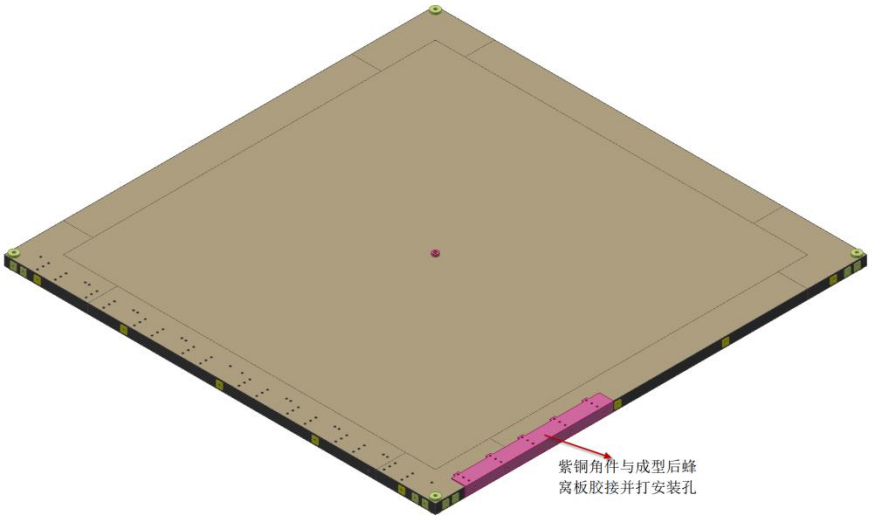


图 5-6 STK 单机单层蜂窝板紫铜角件设计示意图

STK 单机 8 层蜂窝板完成成型和紫铜角件的胶接相关工艺实施后，为了保证 STK 总装后和紫铜角件的良好导热，需将 8 层蜂窝板临时装配后整体加工每面的紫铜角件，保证其整体的平面度和共面度。除紫铜角件外，其余侧面用于安装 TRB 和侧面遮光板结构的隔热凸台均需整体加工保证其共面度。8 层蜂窝板完成整体加工及相关的检验工作后即可交付用于表面探测器的胶接工作。

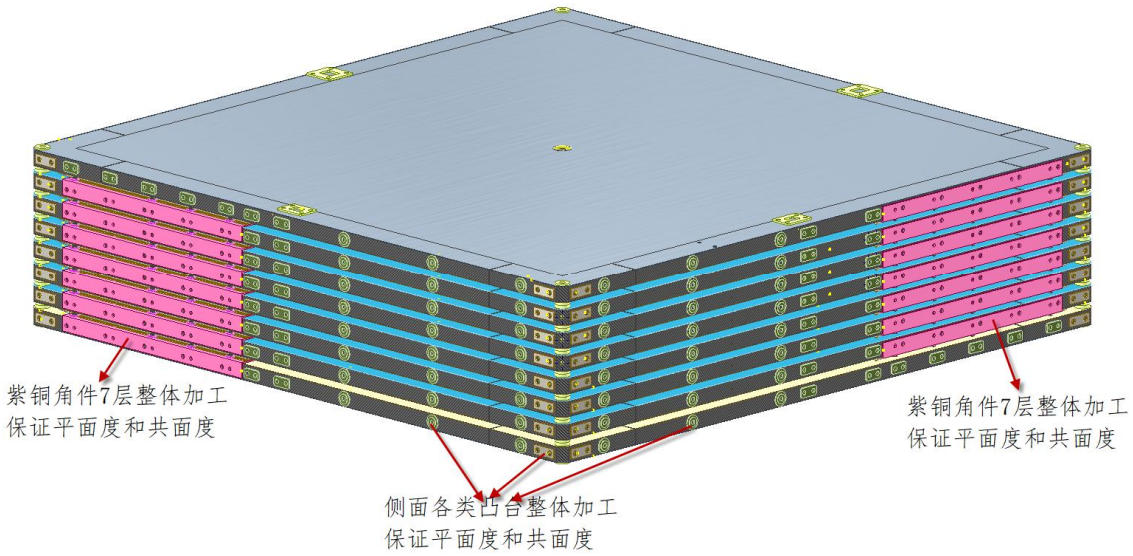


图 5-7 STK 单机 8 层层蜂窝板整体加工说明图

5.2.5. 蜂窝板胶接 ladder 导热设计

STK 探测器为单层设计，即每面蜂窝板蒙皮仅胶接一层 ladder，每

层蜂窝板上下表面各胶接一层 ladder 组成 X 方向和 Y 方向的正交排列 ladder，X 方向的 Ladder 粘接在碳纤维蜂窝板的上表面，Y 方向的 Ladder 粘接在碳纤维蜂窝板的下表面。如此组成 7 大层碳纤维蜂窝板，共分为 7 小层 X 方向的 Ladder，7 小层 Y 方向的 Ladder。

其中前端电子学功耗为 41.12W，按照 7 小层 X 方向，7 小层 Y 方向来计算，每一小层热耗 2.94W。每一小层热耗分布在 8 个 ladder 的前端电子学板之上，每个前端电子学板功耗约 0.37W。

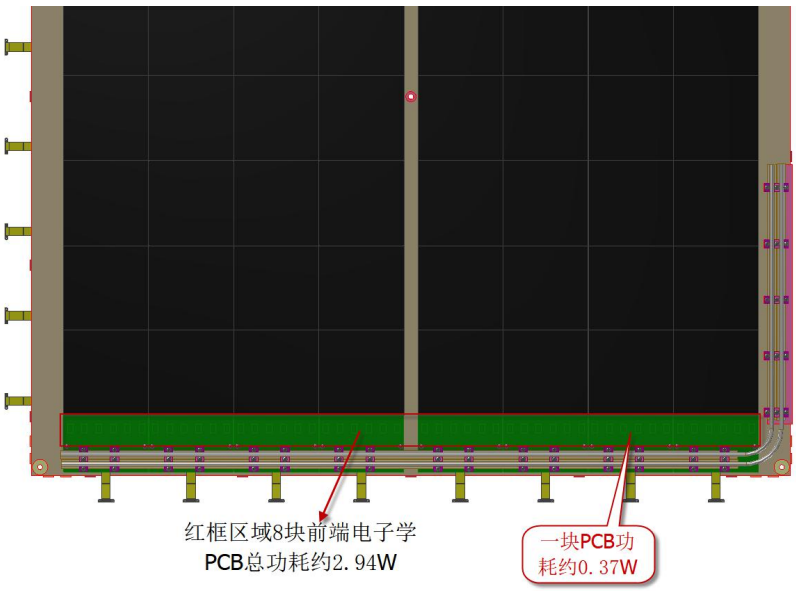


图 5-8 STK 单机蜂窝板导热设计示意图

Ladder 胶接所选用的胶黏剂为 DOWSIL3145 RTV 导电胶和 EPO-TEK® EJ2189-LV 结构胶。前者用于胶接硅片、前端电子学 PCB 和柔性电路板之间的导电区域以实现供电；后者用于胶接硅片、前端电子学 PCB 和柔性电路板以保证胶接强度，以便承受各任务剖面所经历的力学环境。Ladder 与蜂窝板蒙皮胶接选用 EJ2189-LV 结构胶，以便保证 STK 整体的力学环境适应性。此两种胶黏剂均在 2015 年 12 月 17 日发射的“悟空”卫星硅探测器上成功应用，待 HERD 发射时以持续在轨运行满 10 年，且在轨功能和性能正常满足使用要求。

5.2.6. Ladder 胶接设计

Ladder 由硅探测器、前端电子学 PCB、柔性 PCB 和连接器组成。硅探测器为无源器件，其胶接于柔性电路板之上（胶黏剂同样为走线式而非满铺），每片探测器之间使用键合丝相连。每个 ladder 前端电子学 PCB 功耗约 0.3675W，其同样胶接于柔性电路板之上（胶黏剂同样为走线式而非满铺），同相邻硅探测器使用键合丝相连接。前端电子学 PCB 上设计有 4 个通孔用于安装 PCB。前端电子学 PCB 与连接器焊接 PCB 为刚柔板组件，两个刚性 PCB 使用柔性 PCB 实现连接。

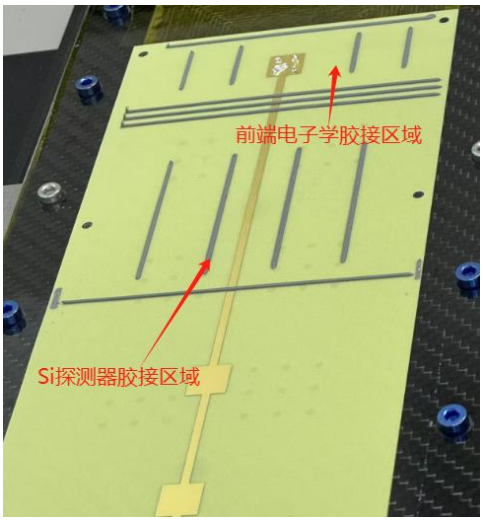


图 5-9 ladder 胶接前端电子学和探测器涂胶示意图

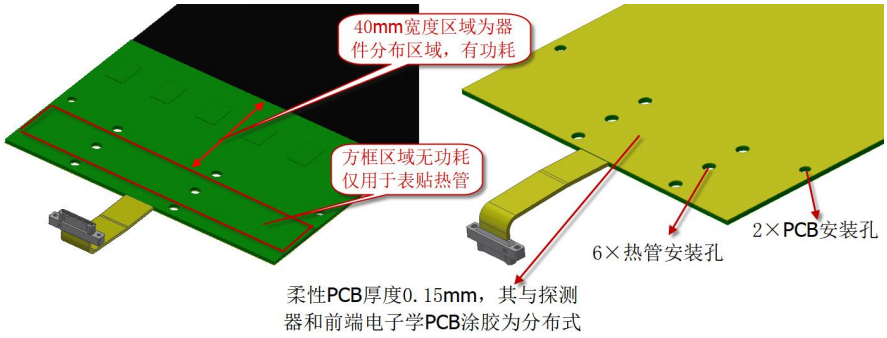


图 5-10　STK 载荷 ladder 导热设计局部视图

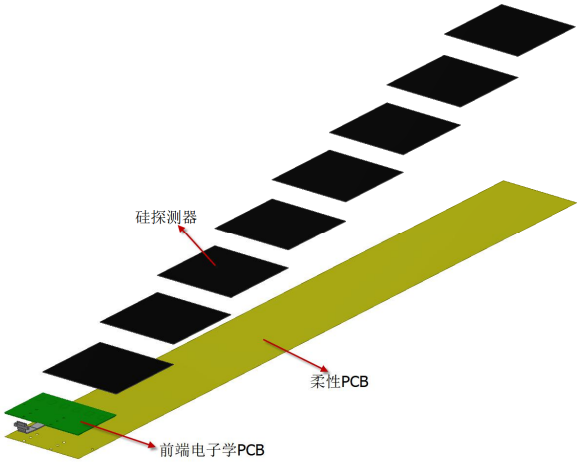


图 5- 11　ladder 组成爆炸图

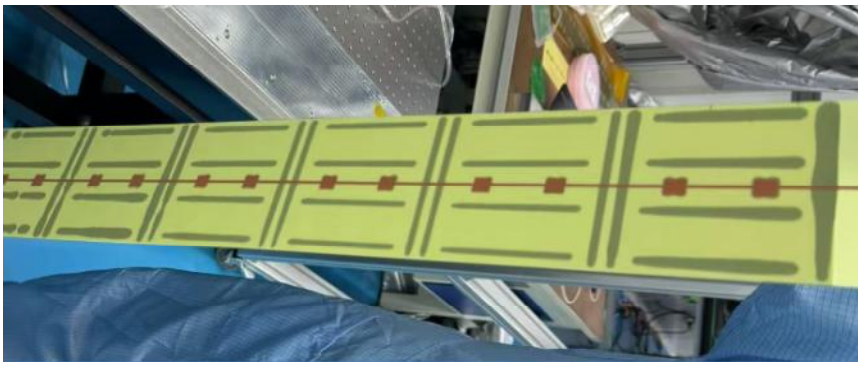


图 5- 12　ladder 胶接 Si 探测器固化后涂胶痕迹图

5.2.7. 蜂窝板胶接 ladder 设计

蜂窝板每面胶接 8 个 ladder，胶接面为碳纤维蒙皮和 ladder 柔性电路板，胶接涂胶为“S”或“回”字形走线式，而非满铺胶黏剂的胶接形式（同 ladder 胶接类似）。由于 STK 的前端电子学功耗分布特点和其主要结构件为碳纤维蒙皮蜂窝板无法用来进行导热和均温，为了将 ladder 前端电子学热耗以最短路径导出，在前端电子学 PCB 远离探测器一侧实施两根单孔热管，热管直接压装在前端电子学 PCB 表面，安装接触面可涂导热胶以增强导热能力。热管型谱为Ω形 10×ϕ5，单孔最大传热能力 10.4W.m。每面两根热管均为 L 型，其一端用于收集前端电子学热耗另一端连接铜角件并与冷板热导通，实现将前端电子学热耗导出。

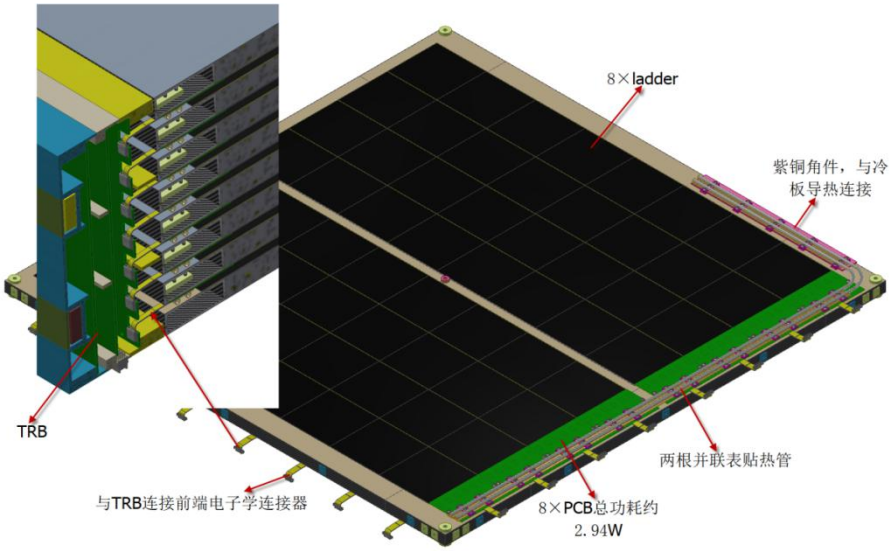


图 5-13 STK 单层蜂窝板探测器导热设计示意图

每层蜂窝板的 ladder 胶接完成后，STK 蜂窝板上除现有 112 个 TFH 上的热敏电阻外，还将在探测器远端每层探测器胶接一个测温点共 14 个温度测点，用于进一步监测探测器的温度分布。

5.2.8. Ladder 导热设计

热管和前端电子学 PCB、紫铜角件均采用螺钉压装接触面涂导热胶的安装形式，蜂窝板前端电子学 PCB 和紫铜角件对应位置预埋金属埋件用于热管安装螺钉紧固使用。热管安装螺钉使用不锈钢螺钉，垫块选用铝合金垫块以增强导热能力。热管和紫铜角件的安装埋件同冷板安装埋件一体化设计，材料选用铝合金以增强冷板和热管之间的直接导热能力。

为了防止在轨由于热变形带来的热管、前端电子学 PCB、紫铜角件和蜂窝板相互之间的变形不匹配问题，热管、PCB、紫铜角件和蜂窝板非金属材料均加工组配合的安装通孔，仅在金属埋件上加工螺纹孔并安装钢丝螺套。

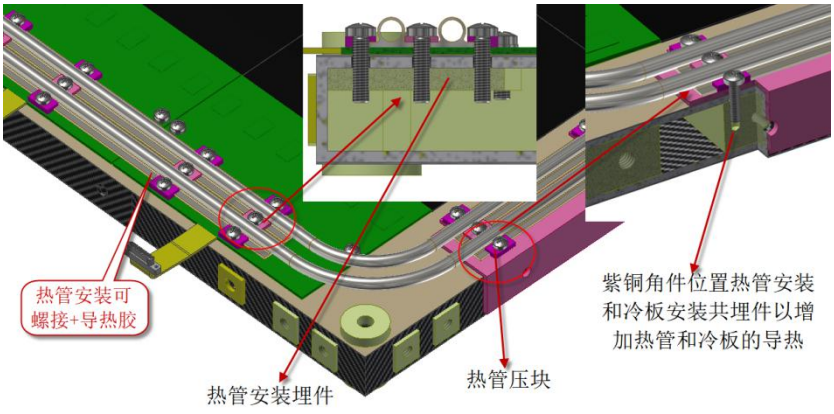


图 5-14 STK 单层蜂窝板探测器热管导热设计示意图

由于单层蜂窝板的一个表面至少胶接一面 8 条 ladder，而每条 ladder 上的前端电子学均为独立 PCB，为了保证两根热管和每个 PCB 的良好导热接触且防止热管安装时发生变形，需在胶接 ladder 实施时使用专用工装保证每一块 PCB 均和紫铜角件的共面度满足热管线平面度的要求。并且为了进一步保证热管与 PCB 之间的接触状态，在安装界面使用导热垫用于填充其不同 PCB 胶接后的高度差，最大限度保证热管和 PCB 之间的导热特性。

对于功耗大面积分布，小热流密度输入的热管使用场景，STK 将结合工程化研制的要求进一步进行热管组件的地面试验验证工作，以支持 STK 热管后续设计及地面试验的总体规划和验证工作。

5.2.9. Ladder 前端电子学导热路径说明

经过 STK 单层蜂窝板、LADDER 胶接导热等设计后形成前端电子学的导热路径图如下图所示，各导热界面设计措施见下表所示：

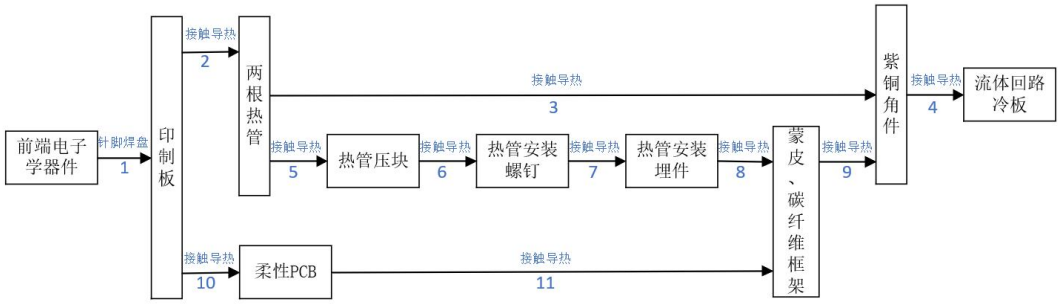


图 5-15 STK 单机前端电子学导热路径图

表 5-6　STK 单机前端电子学导热路径界面设计说明

序号	热界面描述	设计状态
1	元器件通过针脚或焊盘电装于 PCB 表面	针脚或焊盘向 PCB 导热
2	印制板与热管接触导热	接触界面螺接+胶接，热管安装螺钉和压块选用铝合金，增强导热能力
3	热管与紫铜角件接触导热	接触界面螺接+胶接，热管安装螺钉选用不锈钢螺钉，压块选用铝合金，增强导热能力
4	紫铜角件与冷板接触导热	紫铜角件整体加工，冷板与紫铜角件界面使用导热填料，安装螺钉使用不锈钢螺钉，热管安装埋件和冷板安装埋件铝合金一体化设计
5	热管与安装压块接触导热	热管与铝合金压块干接触
6	热管安装螺钉与铝合金压块接触导热	螺钉与铝合金压块干接触，螺钉选用钛合金螺钉
7	热管安装螺钉与埋件接触导热	螺钉与埋件螺纹副接触，螺纹副使用防松胶
8	热管安装埋件与框架接触导热	安装埋件与碳纤维框架成型固化
9	紫铜角件与蒙皮接触导热	紫铜角件与蒙皮胶接固化
10	印制板与柔性电路板接触导热	前端电子学印制板与柔性电路板胶接接触，胶接为线条涂胶胶接，其他区域无胶黏剂
11	柔性电路板与蒙皮接触导热	Ladder 柔性电路板与蜂窝板蒙皮点胶胶接，胶接为线条涂胶胶接，其他区域无胶黏剂

5.2.10.TRB 热设计

前端电子学 PCB 为刚柔刚板的形式，即前端电子学为刚性 PCB，中间部分为柔性 PCB，连接器侧同样为刚性 PCB 用于焊接连接器。每个 ladder 前端电子学均通过刚柔板连接的连接器连接至 TRB 电子学。TRB

机箱与蜂窝板框架隔热安装，于蜂窝板框架侧面设计独立的安装隔热垫，增加接触安装热阻；安装螺钉选用钛合金螺钉并使用非金属套筒对螺钉进行隔热处理；除隔热安装外在 TRB 与蜂窝板相对面实施 5 单元多层组件，降低 TRB 和蜂窝框架之间的辐射换热，防止 TRB 的高温热流向前端电子学低温处流动。TRB 机箱外壳金属结构与流体回路冷板或盘管导热安装，其热量由流体回路收集后排散。

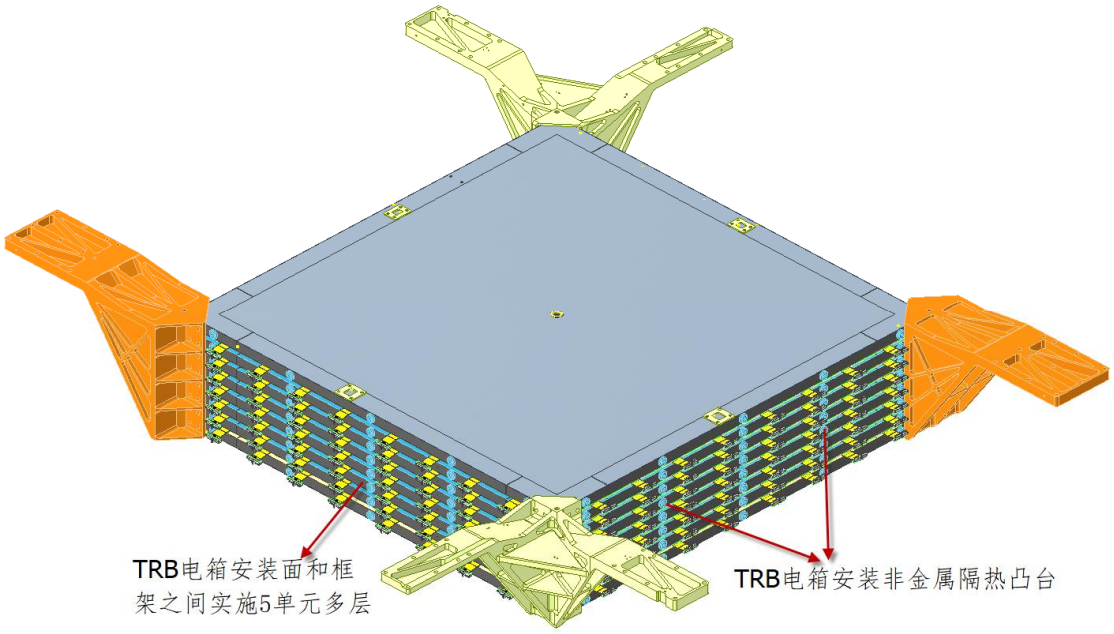


图 5-16 STK 单机 TRB 侧面隔热安装凸台和多层设计示意图

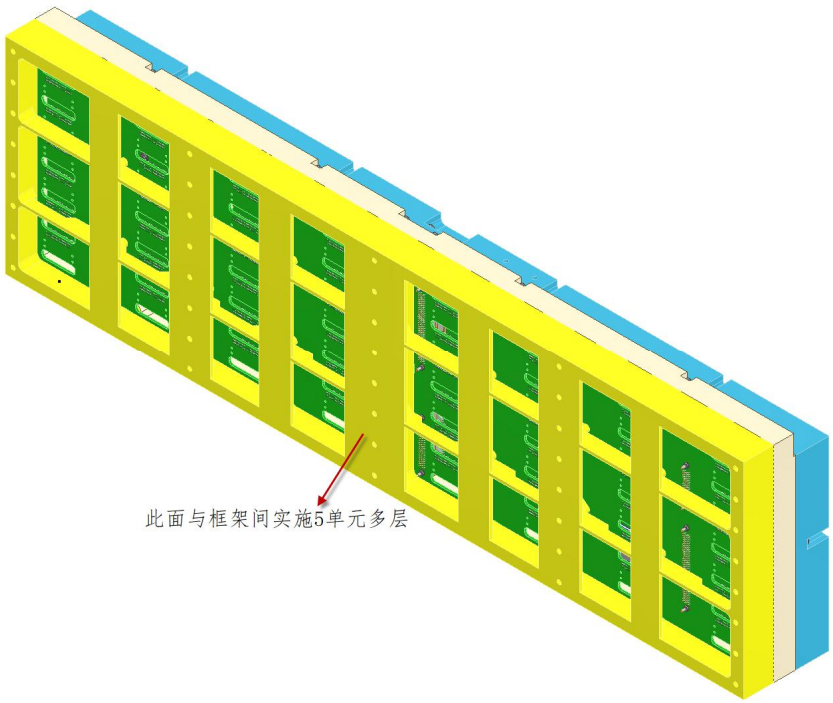


图 5-17 STK 单机 TRB 框架侧面实施多层示意图

TRB 机箱和蜂窝板框架侧面安装导热换热路径如下图所示，各导热环节设计措施见下表所示：

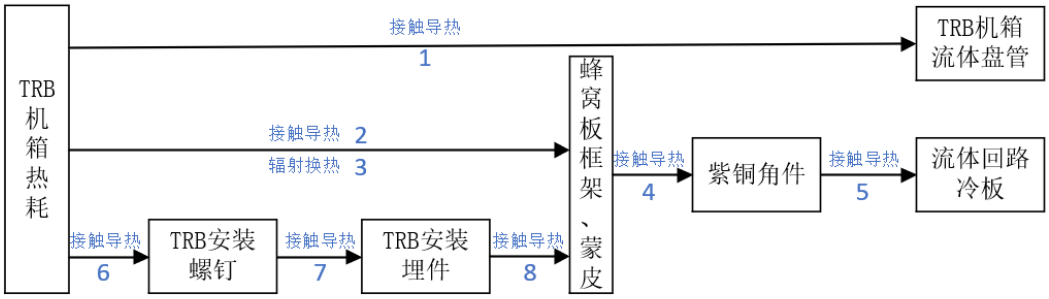


图 5-18　STK 单机 TRB 机箱导热路径图

表 5-7　　STK 单机前端电子学导热路径界面设计说明

序号	热界面描述	设计状态
1	TRB 机箱与盘管接触导热	流体回路盘管与 TRB 机箱外层螺接安装，界面使用导热填料，根据仿真结果盘管可局部增加翅片导热
2	TRB 机箱与蜂窝板框架接触导热	蜂窝板框架侧面设计非金属隔热垫与 TRB 机箱隔热安装
3	TRB 机箱与蜂窝板框架辐射换热	蜂窝板框架侧面与 TRB 内框架与蜂窝板相对面实施 5 单元多层，降低二者辐射换热
4	紫铜角件与蒙皮	紫铜角件与蒙皮胶接固化

	接触导热	
5	紫铜角件与冷板接触导热	紫铜角件整体加工，冷板与紫铜角件界面使用导热填料，安装螺钉使用不锈钢螺钉，热管安装埋件和冷板安装埋件铝合金一体化设计
6	TRB 机箱与安装螺钉接触导热	TRB 机箱与蜂窝板侧面安装选用钛合金螺钉，螺钉使用非金属套筒隔热处理，增加隔热效果
7	TRB 安装螺钉与埋件接触导热	螺钉与埋件螺纹副接触，螺纹副使用防松胶
8	TRB 安装埋件与框架接触导热	安装埋件与碳纤维框架成型固化

TRB 机箱内部，功耗大的 DCDC 模块一类器件直接安装在靠近冷板的金属外壳上、FPGA 等大功耗器件可直接与结构框架凸台建立导热接触等，如无法安装到金属结构的器件则使用导热铜箔等建立和外壳的导热路径，PCB 和结构安装接触面做金属化处理降低其安装热阻。

为了增强 TRB 机箱内部的均温设计，可在 TRB 的 3 层框架结构表面喷涂热控黑漆，增强其内部各金属表面的辐射换热能力，进一步增强结构的均温作用，从而最大限度的利用流体回路盘管将机箱内部的热量收集排散。

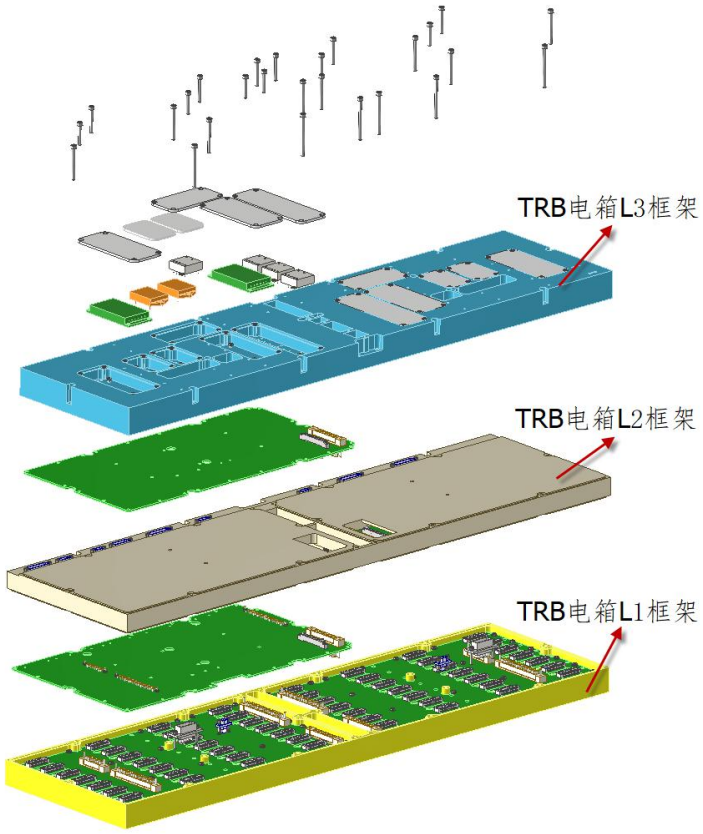


图 5-19 STK 单机 TRB 电子学 DCDC 安装和框架导热设计示意图

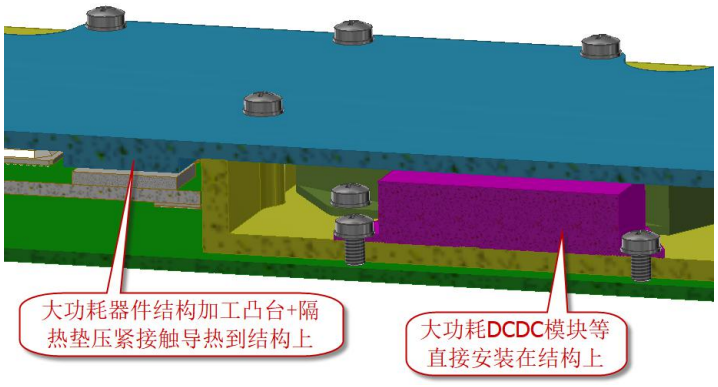


图 5-20 STK 单机 TRB 器件导热设计示意图

TRB 机箱内部电子学的主要导热换热路径图见下图所示，各导热环节设计措施见下表所示：

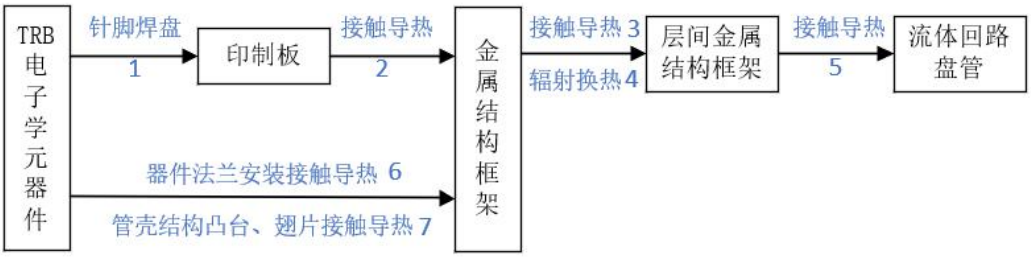


图 5-21 STK 单机 TRB 器件导热路径图

表 5-8　STK 单机前端电子学导热路径界面设计说明

序号	热界面描述	设计状态
1	元器件通过针脚或焊盘电装于 PCB 表面	针脚或焊盘向 PCB 导热
2	印制板与结构框架接触导热	PCB 与结构框架接触区域金属化处理，螺钉选用不锈钢螺钉，螺钉适当密排
3	TRB 机箱 3 层金属框架接触导热	通过加工保证接触面平面度，螺钉选用不锈钢螺钉
4	TRB 机箱 3 层金属框架内部辐射换热	TRB 的 3 层框架结构表面喷涂热控黑漆，增强其内部各金属表面的辐射换热能力
5	TRB 机箱与盘管接触导热	流体回路盘管与 TRB 机箱外层螺接安装，界面使用导热填料，根据仿真结果盘管可局部增加翅片导热
6	器件法兰安装于结构表面接触导热	DCDC 模块等直接利用法兰安装在外层框架，安装螺钉选用不锈钢，安装接触面使用导热填料
7	器件管壳与结构凸台或结构翅片接触导热	大功耗且无安装面器件通过结构加工凸台或安装翅片的形式建立器件与结构框架的直接导热路径

5.2.11.保温设计

STK 处于 PSD 内部，不直接面对外部空间环境，故在 PSD&SCD 子系统温度保证的前提下 STK 无需进行保温。

在热控子系统故障无法维持载荷温度时，STK 可在 KPS 电箱控制下逐层开启探测器进行保温。

1）在 PPMU 故障无法为 HERD 供电时，热控子系统切外部供电进行载荷保温，此时 STK 在其外部载荷能够保证温度的前提无需保温。

5.3. STK 结构材料补充说明

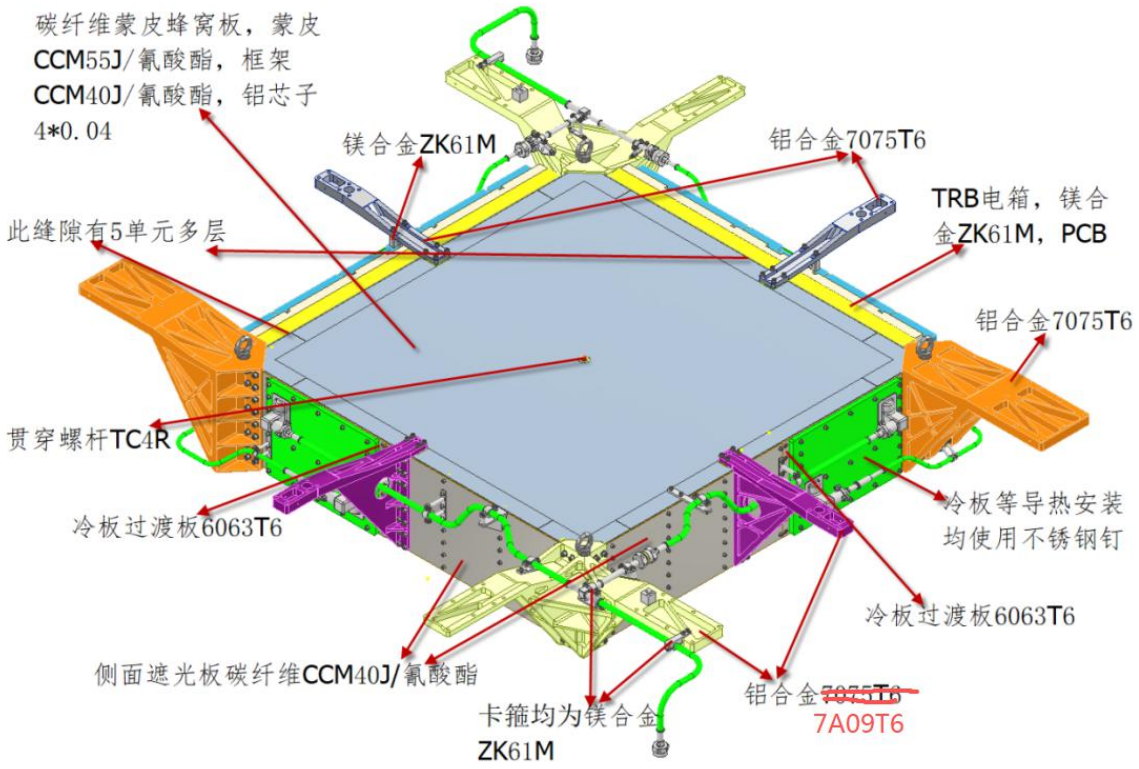


图 5-22 STK 单机整机结构材料说明图

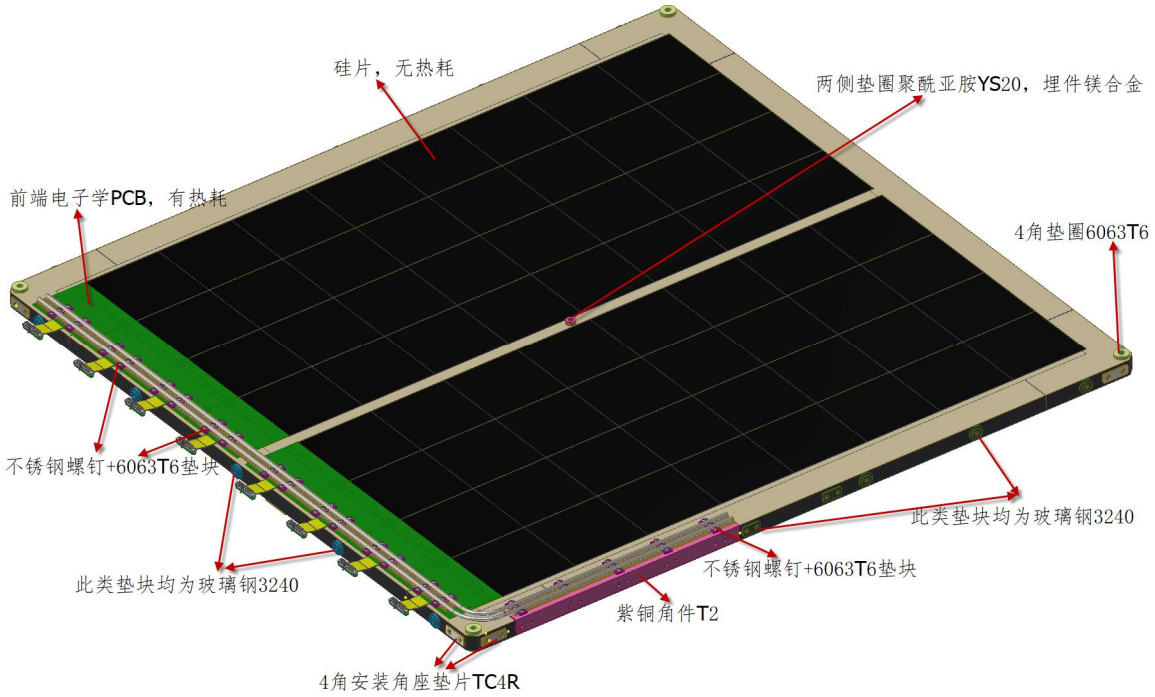


图 5-23 STK 探测器蜂窝板组件结构材料说明图

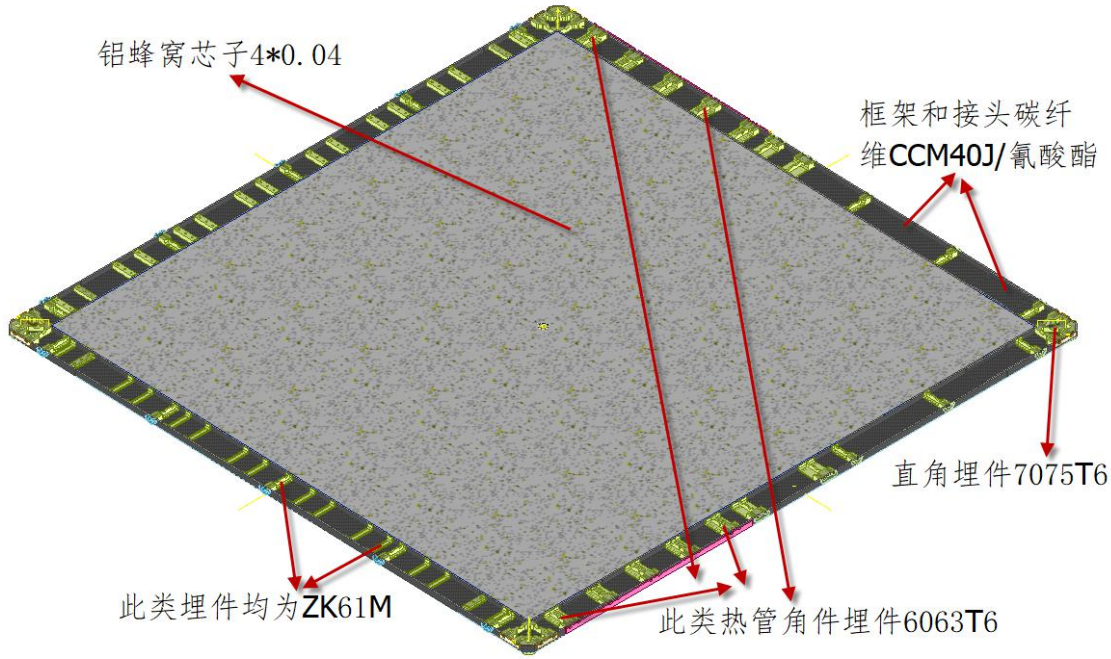


图 5-24 STK 通用/钨板和底蜂窝板结构材料说明图

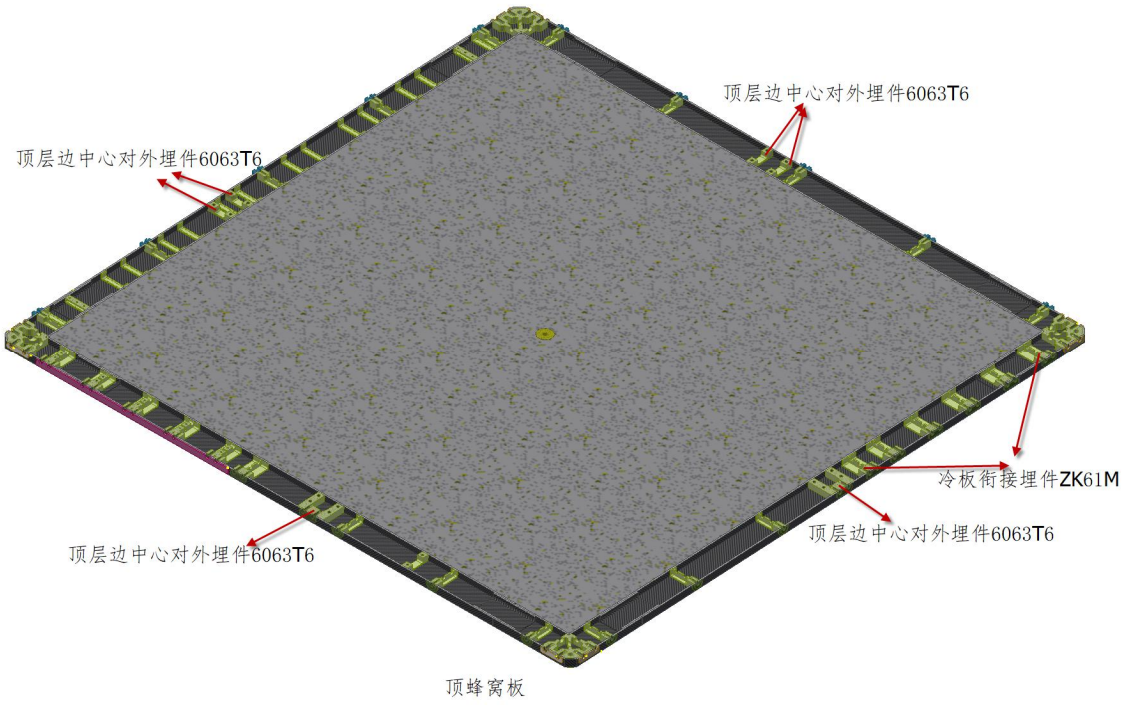


图 5-25 STK 顶蜂窝板结构材料说明图

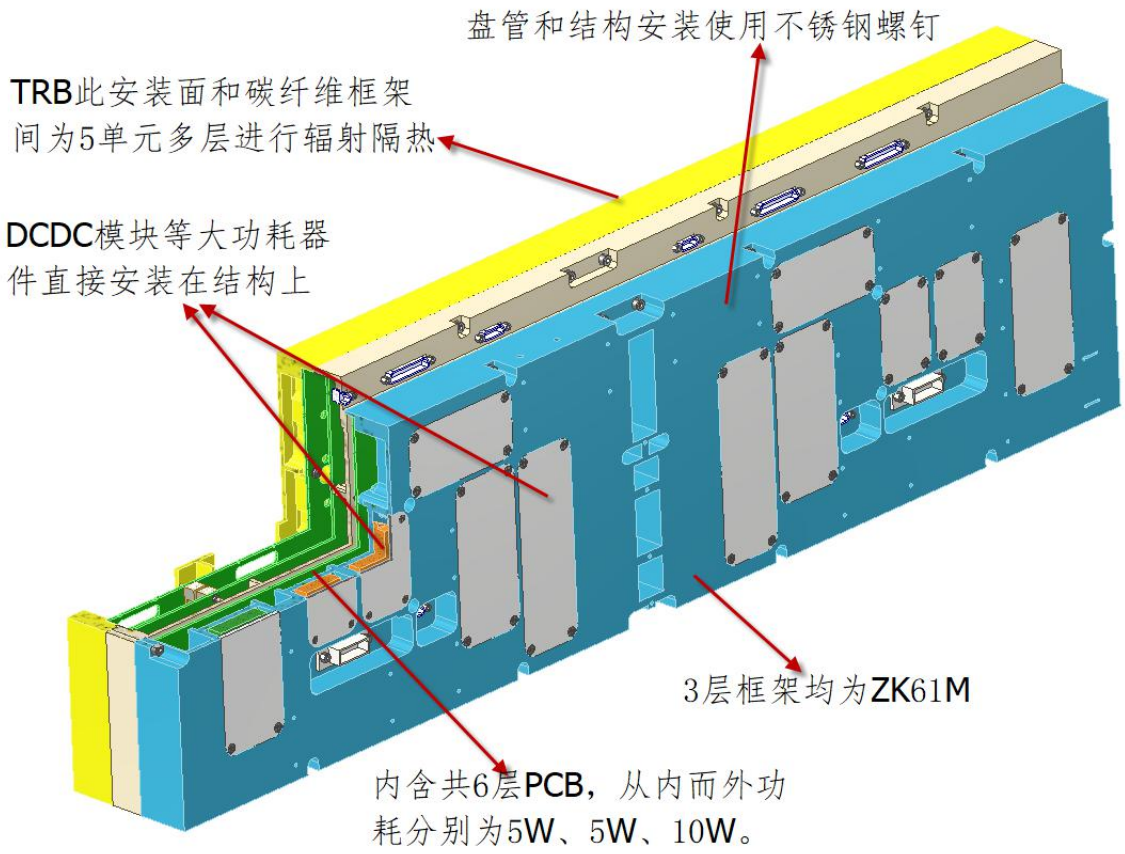


图 5-26 STK TRB 电箱结构材料说明图

6. 量能器热设计

6.1. 任务需求和设计约束

6.1.1. 量能器单机外部热环境设计约束

量能器（CALO）单机下沉安装在主结构中心处的开口内，其上方布局一台 STK 单机，外部为五面的 PSD&SCD 单机，故量能器完全被遮挡在 HERD 内部，不面对外部冷板、各类外热流对量能器无直接影响。

HERD 整体热设计时，为了防止不同单机之间的辐射换热耦合，量能器单机外表面、STK 外表面（底面面向量能器）、PSD 内表面（面向量能器一侧）均包覆多层隔热组件以降低辐射换热； 量能器与主结构安装界面干接触安装，对应主结构安装界面材料为钛合金。

6.1.2. 量能器单机热控界面设计约束

量能器单机使用载荷热控子系统流体回路完成散热，即热控子系统

提供量能器单机所需的冷板温控界面温度控制。热控子系统为量能器设计有 1 路流体支路，通过底部两块长条冷板做为量能器的温控界面。量能器除了自身的冷板外，还安装四块其他单机的配套冷板，按照 HERD 探测器在轨运行坐标系原则，+Z 向为触发冷板和低量程相机冷板，-Z 向为高、中量程相机冷板。这四块冷板组件为四台单机提供光、机、热接口。

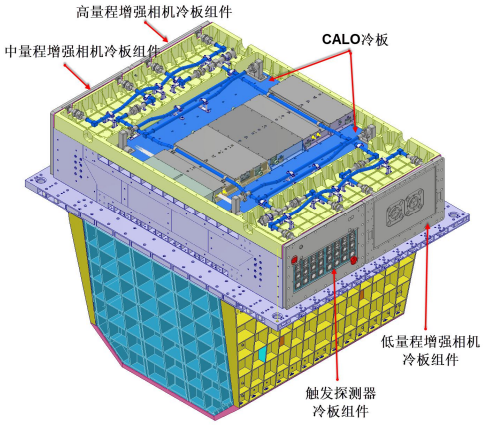


图 6-1　量能器单机外部热控配置图

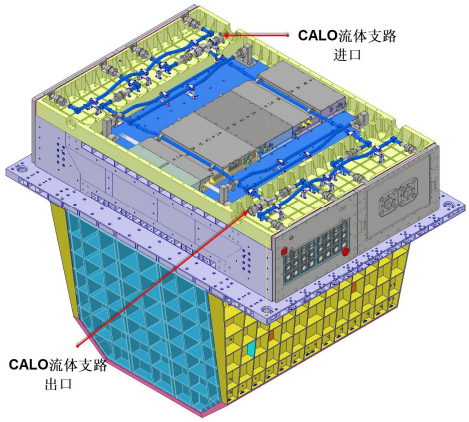


图 6-2　量能器单机流体回路支路进出口设计示意图

量能器不面对外部空间环境，但其与周围子系统之间存在辐射换热以及结构安装接触带来的接触散热。

量能器底部的两组流体回路冷板按界面为量能器单机热控系统的边界条件，所有工况需严格满足下表所列温度区间：

表 9-1　量能器单机热控界面温度范围约束表

单机	部组件名称	热控界面工作温度（℃）		热控界面启动温度（℃）		热控界面贮存温度（℃）	
		下限	上限	下限	上限	下限	上限
量能器	底部冷板	-20	+15	-40	+45	-40	+45
主结构	安装界面	-25	+25	/	/	/	/
PSD	五面外环境	-35	+5	/	/	-40	+40
STK	顶部环境	-20	+22	/	/	-30	+60

6.1.3. 量能器工作模式

量能器在轨状态下常规模式 20W 为测温功耗，其中通信板 14W，电源板 6W；保温功耗为常规模式测温功耗 20W；标定模式 55W，最长工作时长 50 分钟；PD 低功耗工作模式功耗为 229W（PD 前端板 151W，通信板 20W，电源板 58W），PD 满配工作模式功耗 330W（PD 前端板 230W，通信板 20W，电源板 80W），PD 与增强相机错峰开机，不会有功率叠加工况。

表 6-2　量能器工作模式汇总表

部组件		数量	单层功耗 W	总功耗 W	备注
标定	标定前端	23	1.5	34.5	仅标定时工作
	后端电子学	1	20	20	通信板 14W，电源板 6W
PD	低功耗模式	1	229	229	错峰工作
	满配模式	1	330	330	错峰工作
	常规/保温	1	20	20	通信板 14W，电源板 6W

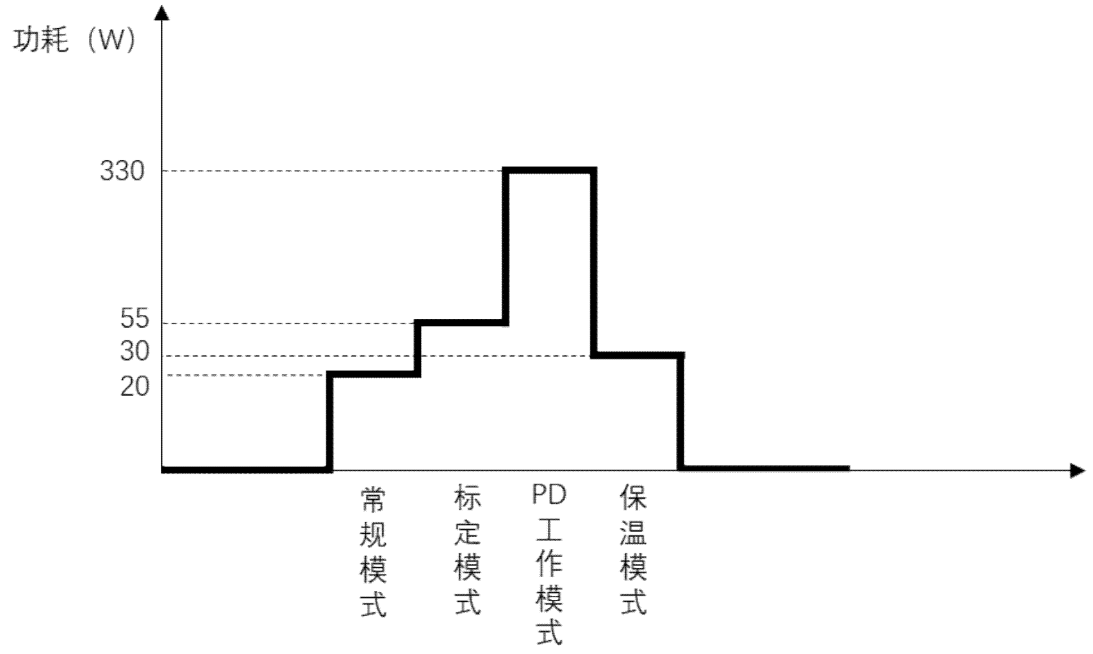


图 6-3 量能器工作模式及热耗示意图

6.1.4. 量能器单机全任务剖面热控设计输入

量能器单机全任务剖面对于单机热控的相关工作内容和所涉及工作模式描述见下表所示：

表 6-1 量能器单机全任务剖面热控工作模式描述

任务剖面	主要事件	热控工作内容和模式描述
发射上行及贮存阶段	发射上行、单舱自主运行、交会对接、在轨贮存	量能器单机不加电。
大机械臂转运阶段	大机械臂转运、HERD 与平台对接供电	量能器单机不加电
在轨工作阶段	HERD 在轨工作	1）量能器单机按照在轨工作模式加电开机，单机热控需保证单机内部温控满足在轨工作需求； 2）部分载荷单机在轨维护更换时（有流体回路和热控保温），量能器在热控子系统提供的热控界面贮存温度基础上，满足单机内部贮存温度需求； 3）PPMU 更换时全部单机无法加电工作； 热控电箱更换时，热控子系统无法加电工作，量能器子系统视情开启最小功耗模式保温。

6.1.5. 量能器单机热控功能及指标要求

量能器单机热控需满足以下主要功能要求：

1）保证量能器单机内晶体和光纤的温度满足其工作温度范围要求、温度稳定性要求及存储温度范围要求；

2）保证量能器单机标定和 PD 电子学的温度满足在轨 I 级降额要求。

表 6-2 量能器功耗分布及温控要求

名称	数量(套)	功耗(W)	总功耗(W)	工作温度	界面工作温度	界面启动温度	存储温度
晶体	7489	0	0	-20~+25	-20~+15	-40~+45	-40~+45
光纤	7489 组	0	0	-20~+25			
导流板	23	0					
标定前端板	23	1.5	34.5	-30~+80			
PD 及排线	7489	0.000001	0.0075	-20~+25			
PD 前端板	23	10（平均）	230（满配）	-20~+85			
PD 通信板	2（含冷备）	20	20	-35~+85			
PD 电源板	2（含冷备）	80（满配）	80（满配）	-35~+85			

合计（含PD）	365				

6.2. 任务分析

量能器布置于 HERD 载荷内部，不直接暴露于冷空环境，不受外部复杂轨道外热流直接作用，基础温度环境条件相对有利，热控核心管控重点由抵御外部太阳直射、地影强交变热流，转变为精准控制量能器与周边单机、支撑界面之间的辐射换热与导热耦合；量能器主体承力结构采用大尺寸碳纤维格栅板，该材料导热呈各向异性、等效导热能力偏弱，无法依靠自身结构高效传散热量，因此热设计需在传热通路中增设高导热金属介质构建导热链路，同时在量能器与外部支撑结构之间设置隔热措施，阻断不必要的导热漏热；载荷内部热源分布特征显著分化，包含大量无热耗输出的晶体探测单元，以及分散布置在 23 层栅格组件上的前后端读出电子学，热源与非热源区域交错分布、热耗极不均匀，晶体对工作温度区间要求严苛，需实现热源区与晶体探测区的热隔离，削弱电子学发热对晶体温度场的干扰；同时需要为每一层电路板规划最优导热路径，建立单层电子学板到外部温控界面稳定、低接触热阻的导热链路，保证各层电子学热点热量有序导出，兼顾晶体温度稳定与电子学器件控温要求，保障量能器能量分辨与刻度稳定性。

6.3. 量能器热设计方案

6.3.1. CALO 结构组成

CALO 单机包含 23 层碳纤维栅格组件、一套外围支撑结构、PD 和标定前端电子学组件、后端电子学机箱及底板组成。主要部组件产品如表 1 所示。CALO 的整体结构组成示意图如图 1 所示。

表 1. CALO 主要构成部组件

序号	组成部分	数量	材料	备注
1	碳纤维栅格组件	23 层	CCM40J/氰酸酯	晶体组件胶接于栅格上，PD 芯片胶接在晶体上，PD 柔性板胶接在碳纤维栅格背板上
2	晶体组件	23 层 共 7489 块	LYSO	灌封在碳纤维栅格组件内

3	PD 柔性板	23 层	FPCB	胶接于碳纤维栅格组件背板
4	导流板	23 层	镁合金 ZK61M	位于碳纤维栅格组件下方，正面安装标定前端电子学，背面安装 PD 前端电子学，底部与底板接触导热，顶部与栅格隔热
5	标定前端板	23 层	电子学组件	有热耗，位于每层碳纤维栅格组件导流板正面
6	PD 前端板	23 层	电子学组件	有热耗，位于每层碳纤维栅格组件导流板背面
7	后端电子学机箱（含标定和 PD）	1 套	铝合金 6063	包含 PD 和标定后端电子学机箱，有热耗
8	底板	1 件	铝合金 7075	与冷板导热接触安装
9	碳纤维支撑框架	1 套	CCM40J/氰酸酯	
10	顶板	1 套	CCM40J/氰酸酯	
11	前后面板	2 件	CCM40J/氰酸酯	
12	左右侧板	2 件	CCM40J/氰酸酯	
13	量能器冷板	2 套	铝合金	整机热边界，安装在底板下方，需地面试验件
14	侧面冷板	4 件	铝合金	增强相机和触发冷板，与量能器框架和底板隔热安装
15	管路卡箍	若干	铝合金	
16	配套紧固件	若干	钛合金/不锈钢	
17	配套线缆	若干	/	
18	热控相关产品	若干	/	乙方提供

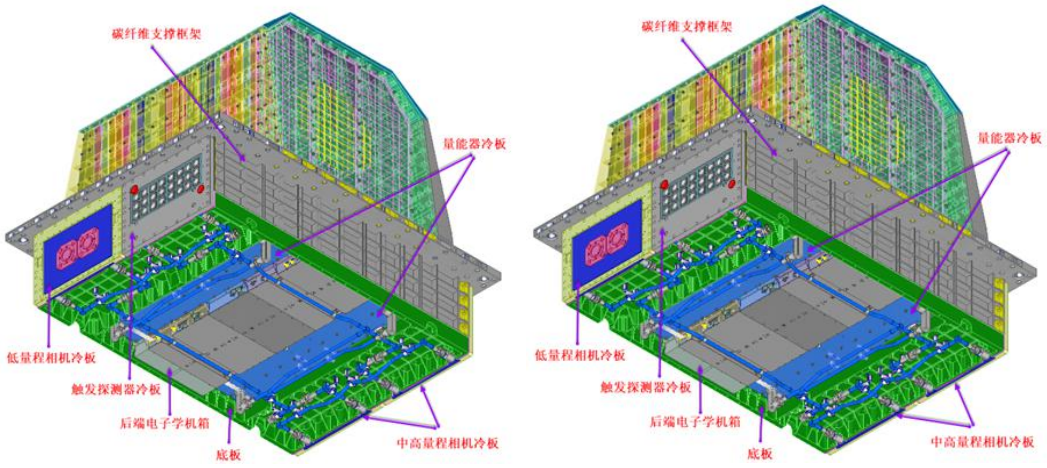


图 1 CALO 单机结构示意图

6.3.2. 量能器质量分布及单机尺寸

量能器本体尺寸：1514×1154×1115；包络尺寸：1514×1168×1125。

量能器质量：≯2010kg

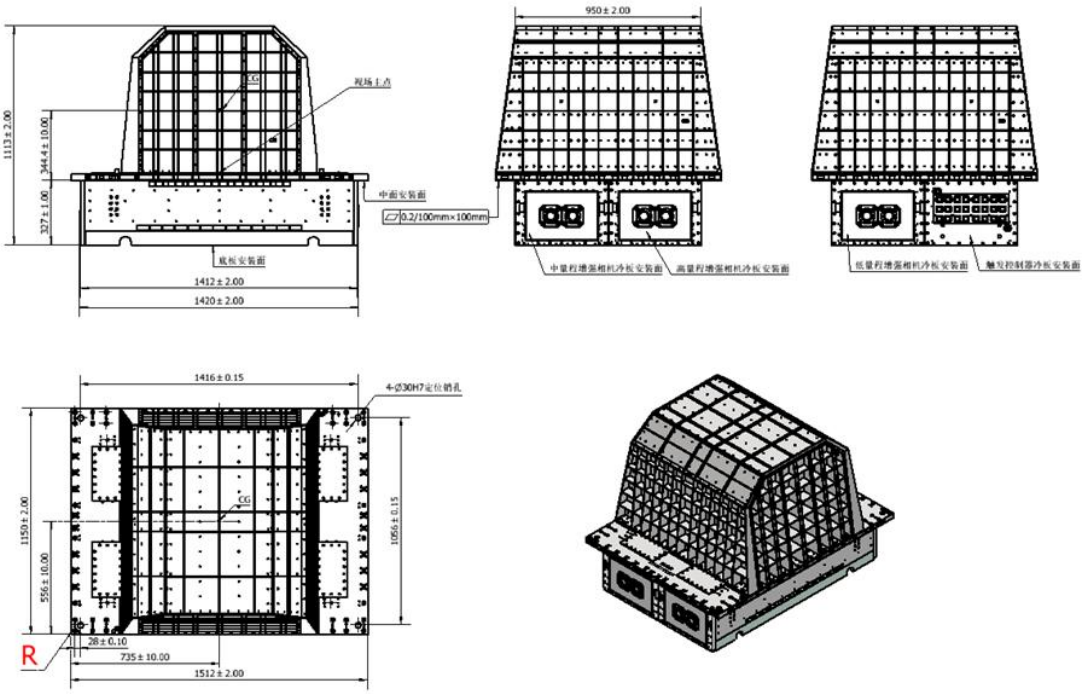


图 6.3- 1 量能器三视图

表 6.3- 1 量能器质量汇总表

序号	部组件名称	材质	密度	数量（件）	单件质量（kg）	总质量（kg）
1.	LYSO 晶体	LYSO	7.14	7489	0.19278	1443.8
2.	晶体灌封胶	301-2	/	7489	0.003429216	25.7
3.	光纤耦合膜	Sylgard 184	/	7489	0.00171	12.8
4.	晶体托盘	有机玻璃	/	7489	0.001	7.5
5.	反射膜	ESR	/	7489	0.00156	11.7
6.	碳纤维栅格（含埋件）	CCM40J/铝合金	1.7	23	6.74	155
7.	导流板	ZK61M	1.8	23	2.2	50.6
8.	支撑框架（含埋件）	CCM40J/铝合金	1.7	1	58	58
9.	前后面板	CCM40J/铝合金	1.7	2	16	32
10.	侧板	CCM40J	1.7	2	11	22
11.	顶板	CCM40J/铝合金	1.7	1	8.1	8.1
12.	埋件粘接胶	/	/	/	/	8
13.	承力底板	7075	2.7	1	47	47
14.	导流板互联	ZK61M	1.8	2	0.8	1.6
15.	光纤固定卡子	铝合金	2.7	736	0.02	14.7
16.	光纤套管	RSG 热缩套管	/	7489	0.00031	2.3
17.	PD 及电子学	FR4	/	/	51	51
18.	标定电子学	FR4	/	/	22.2	22.2

19.	相机微孔板	铝合金/聚酰亚胺	2.7	6	1	6
20.	触发微孔板	铝合金/聚酰亚胺	2.7	24	0.025	0.6
21.	相机转接框	铝合金	2.7	3	2.8	8.4
22.	触发转接框	铝合金	2.7	1	1.9	1.9
23.	相机冷板	铝合金	2.7	3	质量算热控	12.5
24.	触发冷板	铝合金	2.7	1		
25.	螺钉	钛合金	4.5	1949	0.008415	16.5
26.	热包覆	/	200g/m2	1	1	1
27.	管路卡子	铝合金	2.7	20	质量算热控	1
28.	质量合计					2008.4

6.3.3. 量能器功耗分布

量能器单机共包括 23 层晶体模块，每层晶体模块由晶体阵列、光纤、标定前端电子学板和 PD 前端电子学板组成，通过碳纤维栅格和镁合金导流板支撑，每个晶体模块的导流板下方与底板连接，前端电子学通过连接器和线缆与底部的后端电子学机箱实现电信号连接。

量能器的热源有 3 种：23 层标定前端电子学板、23 层 PD 前端电子学板和后端电子学机箱。晶体和 PD 芯片可以看做无热源，每层标定前端电子学功耗 1.5W，23 层共计 34.5W，标定时标定光源前端电子学和后端电子学部分工作，每次标定时长不超过 50 分钟。每层 PD 前端电子学对应不同的 ASIC 数量功耗从中心层向外逐层递减， 23 层 PD 前端电子学满配模式功耗共计 230W，低功耗模式 PD 前端电子学总功耗为 151W。标定和 PD 前端电子学均通过镁合金导流板向外传导热量。后端电子学集

成为一台机箱，后端电子学机箱含电源板和通信板，电源板功耗满配 80W，低功耗模式 58W，通信板满配和低功耗模式均为 20W，所以后端电子学满配总功耗为 100W，低功耗模式总功耗为 78W。导流板和后端电子学机箱均与底板导热安装，量能器的功耗均由两块冷板导出。

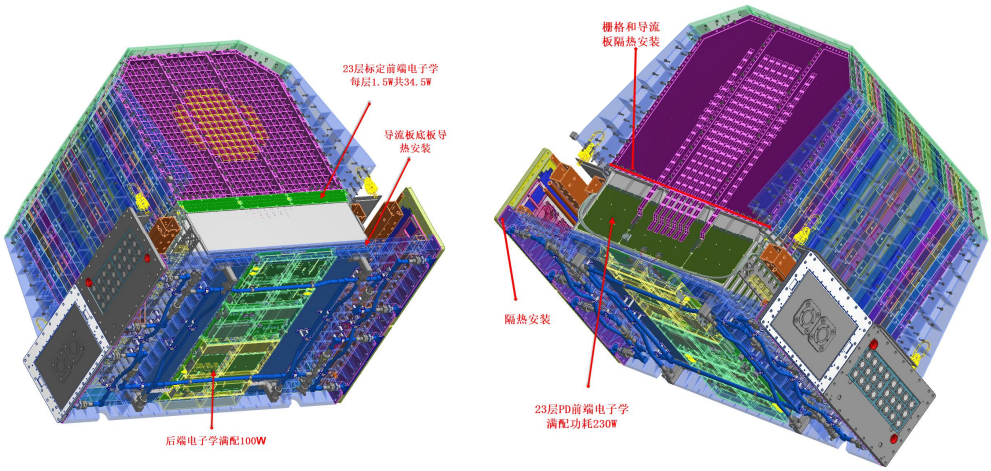


图 6-5　量能器单机总体热控示意图

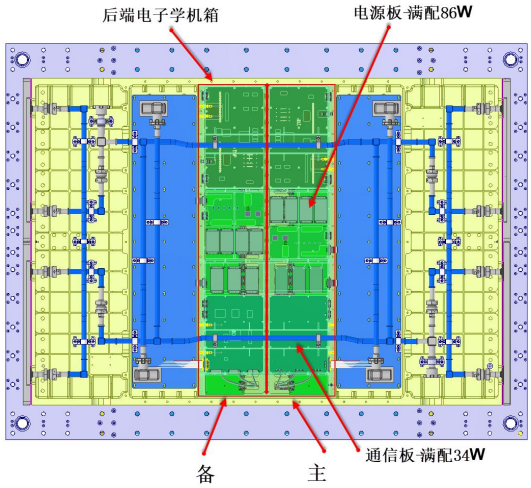


图 6-6 后端电子学主备布局示意图

下表为 23 层每层 PD 前端电路板上对应的 ASIC 的数量。每层电路板功耗根据 ASIC 芯片的数量有差异，LDO 的功耗按照 ASIC 的数量比例递减，满配模式下最大一层电路板功耗为 12W，最小一层电路板功耗为 6W。低功耗模式下最大一层 PD 前端电路板功耗为 8W，最小一层电路板功耗为 5 W。

表 6-4 满配模式下每层 PD 前端电子学功耗分布

栅格编号	PDs(ASICs)	功耗	栅格编号	PDs(ASICs)	功耗	栅格编号	PDs(ASICs)	功耗	栅格编号	PDs(ASICs)	功耗
0	291(6)	6	6	1173(21)	12	12	1317(21)	12	18	975(18)	10
1	483(9)	6	7	1221(21)	12	13	1293(21)	12	19	831(15)	9
2	663(12)	8	8	1257(21)	12	14	1257(21)	12	20	663(12)	8
3	831(15)	9	9	1293(21)	12	15	1221(21)	12	21	483(9)	6
4	975(18)	10	10	1317(21)	12	16	1173(21)	12	22	291(6)	6
5	1071(18)	11	11	1317(21)	12	17	1071(18)	10			
合计										22467 (387)	230W

表 6-5 低功耗模式下每层 PD 前端电子学功耗分布

栅格编号	PDs(ASICs)	功耗	栅格编号	PDs(ASICs)	功耗	栅格编号	PDs(ASICs)	功耗	栅格编号	PDs(ASICs)	功耗
0	100%	6	6	47%	7	12	51%	7	18	44%	6
1	100%	6	7	48%	7	13	50%	7	19	48%	5
2	100%	8	8	49%	7	14	49%	7	20	100%	8
3	48%	5	9	50%	7	15	48%	7	21	100%	6
4	44%	6	10	51%	7	16	47%	7	22	100%	6
5	45%	6	11	51%	7	17	45%	6			
合计				22467 (387)				151W			

PD 前端电子学电路板安装在每层导流板背面，大功耗器件通过结构凸台接触导热，不同层数 ASIC 数量不同，从两侧往中间逐渐减小。PD 前端电子学满配工作时总功耗为共 230W，后端电子学安装在底板中间一侧，满配工作时总功耗为 100W。位置示意图如下所示；

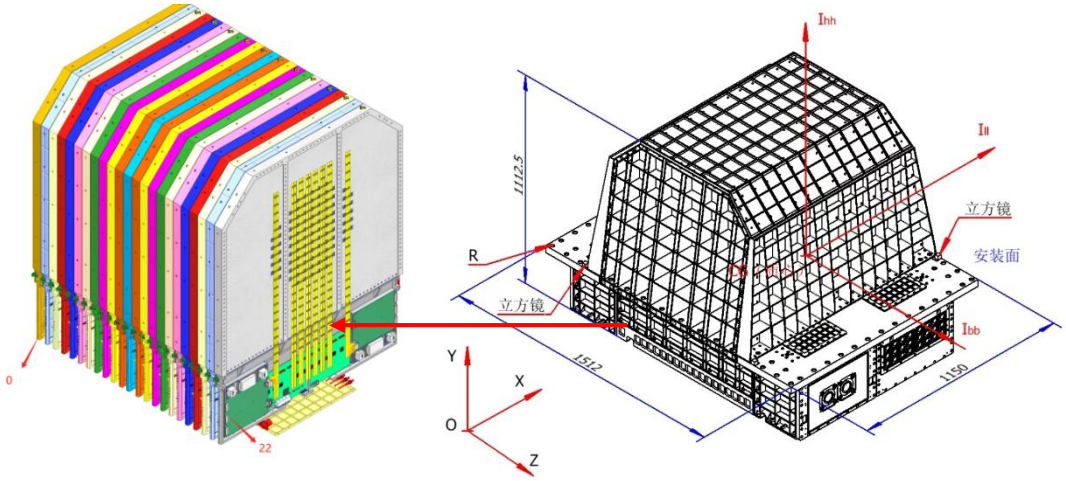


图 6-7 量能器单层编号及坐标示意图

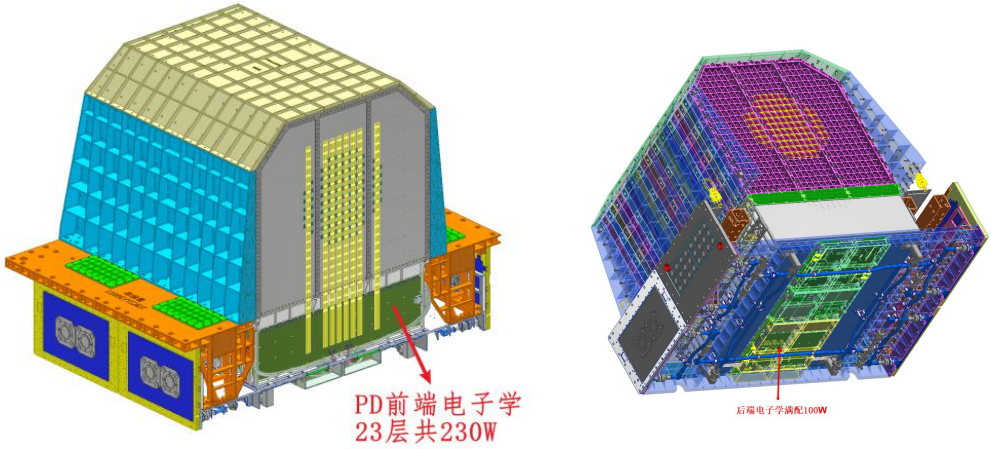


图 6-8 量能器热耗分布示意图

6.3.4. 单层晶体组件导热及隔热设计

每层晶体模块由碳纤维栅格板和导流板承载，每个晶体组件采用波移光纤和 PD 双读方式，晶体组件通过环氧胶封装在每个晶格内。碳纤维栅格板正面为晶体和波移光纤，光纤向下引出至下方的镁合金导流板正面，导流板与栅格板隔热安装，导流板上方靠近光纤出口位置安装标定前端电子学板，标定前端电子学通过接触传导将热量传导至导流板上。碳纤维栅格板背面为 PD 芯片，PD 芯片通过柔性板向下连接至导流板背面的 PD 前端电子学上。PD 前端电子学通过与导流板的导热安装将热量传递至导流板。PD 前端电子学大功率器件直接与导流板内壁直接接触导热提高导热效率。

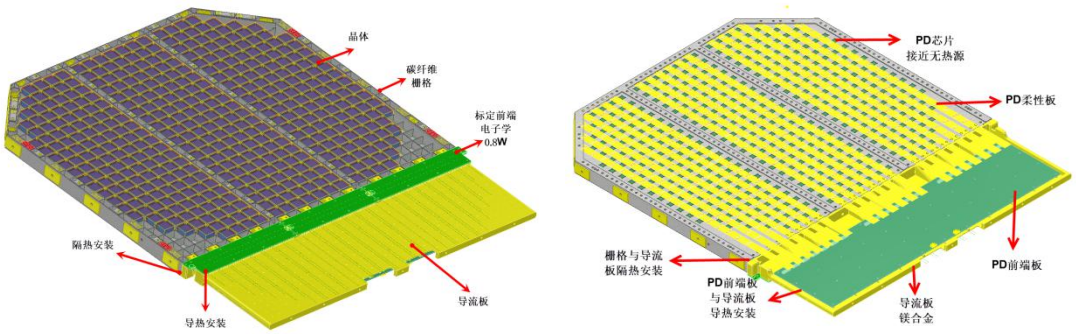


图 6-9 量能器单机晶体模块设计示意图

量能器单机 23 层碳纤维栅格完成成型和埋件的胶接工艺后，分别与导流板装配到位，为了保证 23 层导流板总装后与底板的良好导热，需要将 23 层碳纤维栅格及导流板临时装配后整体加工导流板底面，保证其整

体的平面度和共面度。除导流板外，23 层碳纤维栅格的外侧面用于安装外承载和遮光结构的非金属垫片也需要整体加工保证其共面度。量能器单机所有支撑结构完成整机加工机重复拆装复位检验后才可交付子系统用于晶体组装工作。

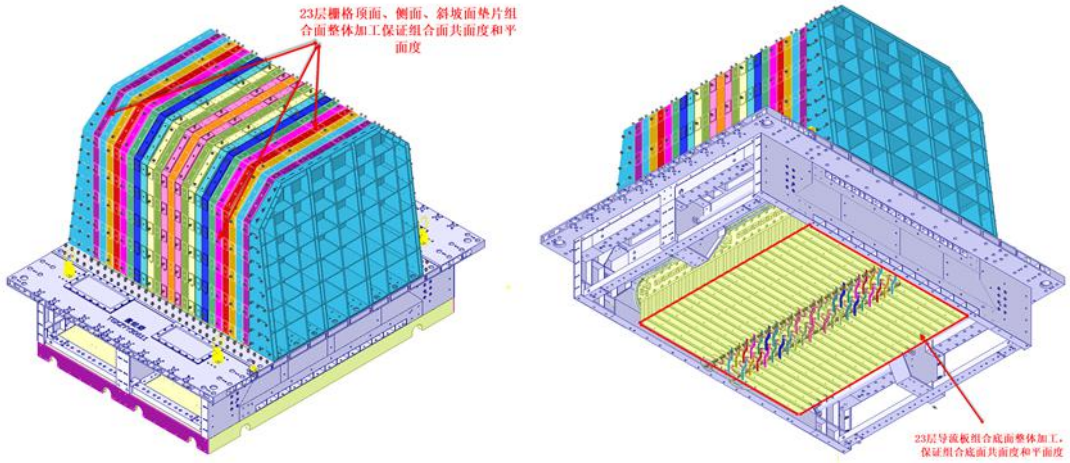


图 6-10　量能器单机 23 层碳纤维栅格和导流板整体加工说明图

23 层导流板的下方分别与量能器单机铝合金大底板内表面通过涂抹导热胶导热连接，底板中间导热安装后端电子学机箱，底板两侧分布两块长条冷板。

6.3.5. 相机和触发冷板设计

量能器左右两个框架外侧并排安装两块冷板，分别适配增强相机与触发探测器的光机热接口。基于整体避光性能需求，冷板内侧设置与框架适配的止口，冷板外侧设置与相机及触发模块适配的避光止口。

四块冷板与碳纤维框架侧面干接触安装，框架内部并无热源，碳纤维材料热导系数低，本身导热能力比较差，再叠加上干接触安装接触热阻较大，可尽量减少冷板和量能器框架之间的热传递。鉴于冷板兼具光学读出界面、散热界面及机械承载功能，其厚度设计为 20mm，可其中触发冷板组件拆分为微孔板组件、微孔板转接框和冷板。冷板 10 毫米为流道空间，剩余 10 毫米为结构板用于触发的安装。相机为了保证高精度配合，微孔板组件结构需要承受面内压力，为了避免冷板承受这一面内

压力，将相机的冷板与微孔板组件分开，两者分别与金属转接框连接，将冷板、支撑面板、微孔板组件解耦，并通过一定的柔性设计实现不同界面的间隙要求。

为了防止不同设备之间的相互影响，四块冷板与量能器框架外侧和底板外侧组合面隔热安装。

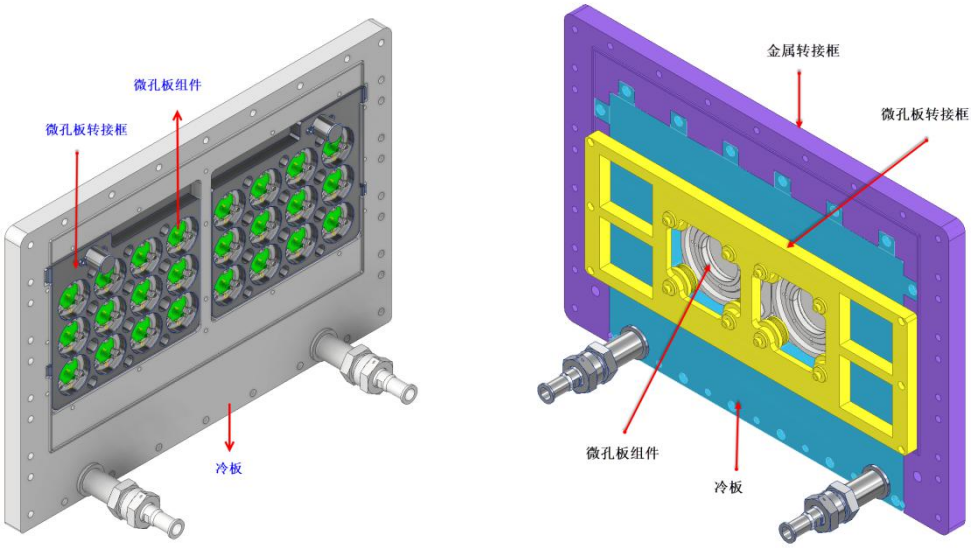


图 6-11　触发微孔板组件（左）；相机微孔板组件（右）

6.3.6. 底部后端电子学机箱导热设计

标定和 PD 前端电子学将热量通过安装界面及散热凸台传导至导流板上，23 层导流板与底板通过螺钉连接导热，底板箱体两侧的整面板上安装两组长冷板，作为量能器整机的热控界面。该长冷板可直接对底板上方的电子学模块进行散热，从而保障标定模块及 PD 电子学模块的工作温度要求，确保系统稳定运行。

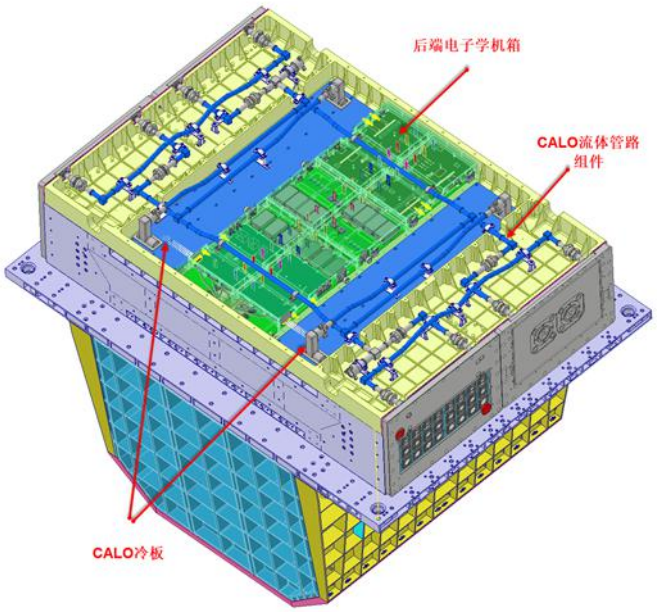


图 6-12 量能器底部布局示意图

底部电子学机箱内部，功耗大的 DCDC 模块一类器件直接安装在机箱的金属结构板上、FPGA 等大功耗器件可直接与结构框架凸台建立导热接触等，如无法安装到金属结构的器件则使用导热铜箔等建立和外壳的导热路径，PCB 和结构安装接触面做金属化处理降低其安装热阻。

为了增强机箱内部的均温设计，可在机箱的框架结构表面喷涂热控黑漆，增强其内部各金属表面的辐射换热能力，进一步增强结构的均温作用，从而最大限度的利用冷板将机箱内部的热量收集排散。

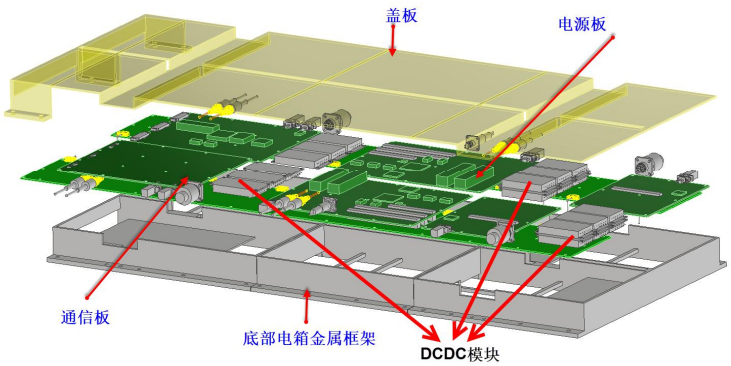


图 6-13　量能器单机底部电子学机箱器件导热设计示意图

6.3.7. 量能器导热路径说明

量能器单机的导热路径图如下图所示，各导热界面设计措施见下表所示：

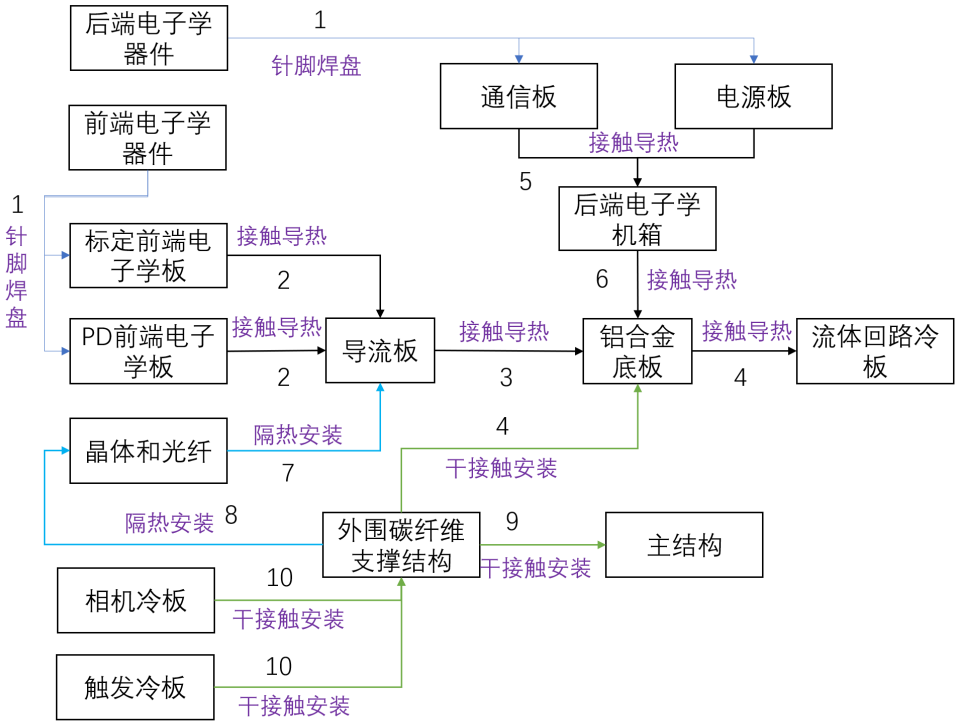


图 6-14 量能器单机电子学导热路径图

表 6-6 量能器单机电子学导热路径界面设计说明

序号	热界面描述	设计状态
1	元器件通过针脚或焊盘电装于 PCB 表面	针脚或焊盘向 PCB 导热
2	印制板与导流板接触导热	接触界面螺接+胶接，导流板为镁合金，PD 前端大功率器件与导流板直接接触+导热垫增加导热效率
3	导流板与量能器底板接触导热	接触界面螺接+导热填料，导流板整体加工，导流板与底板之间使用导热填料，底板材料选择铝合金，增强导热能力
4	底板与冷板接触导热	底板和冷板之间的接触界面螺接+导热填料
5	通信板和电源板与后端电子学机箱接触导热	PCB 板与机箱结构接触界面螺接，电源模块直接通过导热填料安装在机箱结构上增强导热能力
6	后端电子学机箱与底板接触导热	后端电子学与底板之间的接触界面螺接+导热填料
7	晶体阵列栅格与导流板隔热	栅格与导流板之间通过玻璃钢垫片隔热安装，螺钉选用钛合金
8	栅格与外围支撑结构隔热	栅格外侧面与支撑结构之间通过非金属垫片隔热安装，螺钉选用钛合金螺钉
9	外围支撑结构与主结构干接触	外围支撑结构与主结构界面之间碳纤维干接触安装
10	相机和触发冷板与量能器框架干接触	相机和触发冷板与量能器碳纤维框架之间干接触，降低热传导
11	相机和触发冷板与量能器底板隔热接触	相机和触发冷板与量能器底板之间增加隔热垫，降低热传导

6.3.8. 保温设计

量能器处于 HERD 核心位置，外部被 PSD&SCD、STK 和主结构包

围，不直接面对外部空间环境，故在量能器外部子系统或结构温度满足要求的前提下，量能器子系统无需进行保温设计，即量能器内部未设计保温加热器。

在热控子系统故障无法维持载荷温度时，量能器设计有 30W 最小功耗模式用于单机保温使用（标定开机保温）。

6.3.9. 测温设计

量能器共设置 41 个测点，具体位置根据仿真结果给出，测点位置覆盖晶体阵列所有晶体单元温度的监测。

6.4. 量能器结构材料补充说明

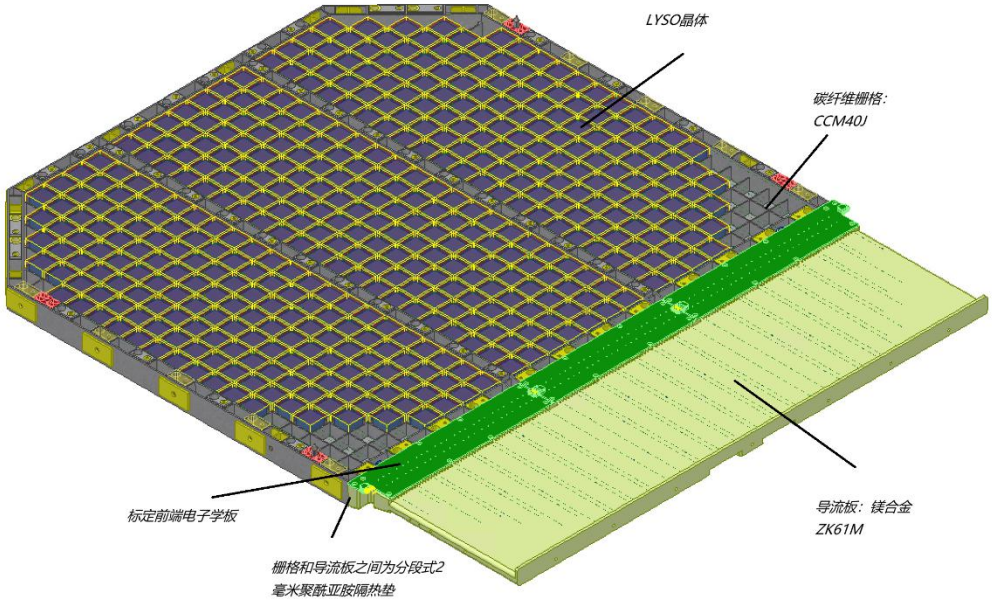


图 6- 15 量能器单层组件结构说明图 1

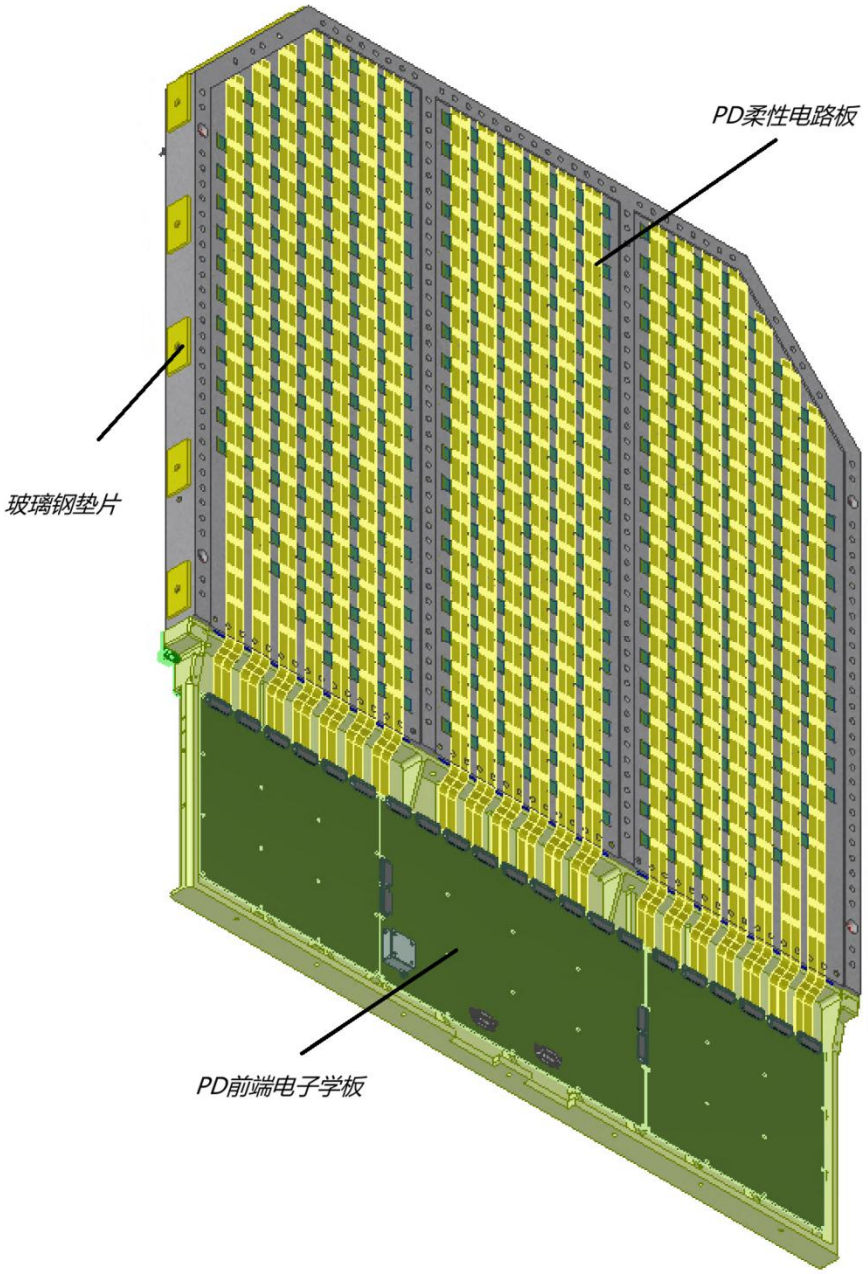


图 6-16 量能器单层组件结构说明图 2

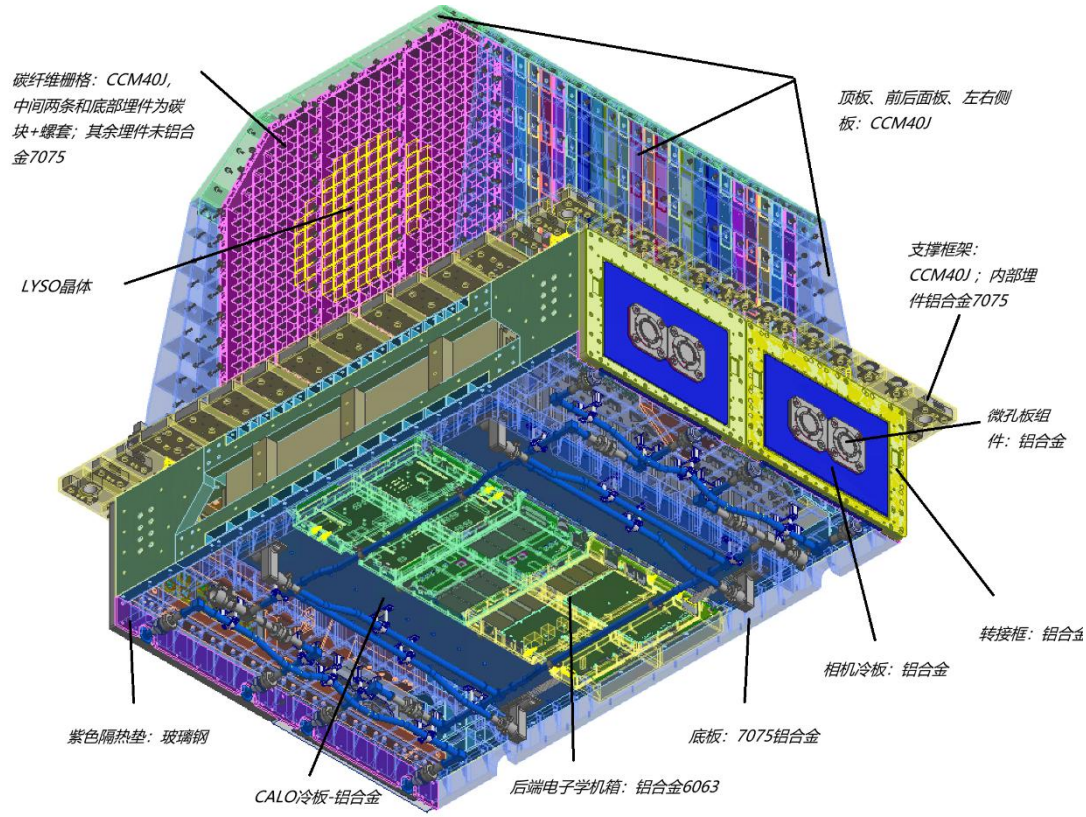


图 6-17 量能器整体结构材料说明图 1

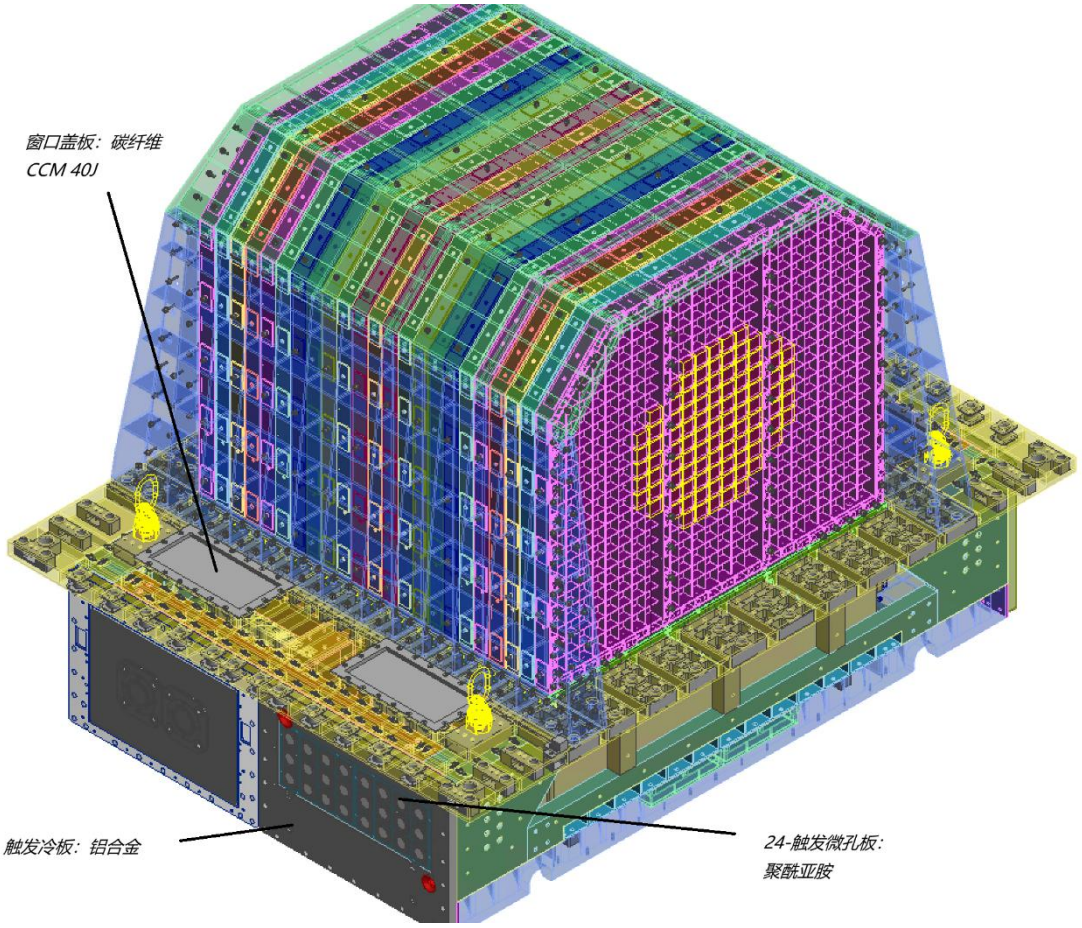


图 6-18 量能器整体结构材料说明图 2