

# 一级抽拉扩展方舱电磁屏蔽新型拼接结构与性能仿真验证

沙小伟

苏州江南航天机电工业有限公司 江苏 苏州 215000

**【摘要】**：针对一级抽拉扩展方舱拼接部位电磁泄漏严重、屏蔽效能不足，且传统拼接结构兼顾抽拉灵活性与屏蔽性能效果不佳的问题，设计一种榫卯插接+导电密封复合式新型电磁屏蔽拼接结构。明确结构核心设计参数，选用铝合金壳体搭配坡莫合金屏蔽夹层与SCS导电密封件，通过HFSS仿真软件搭建三维模型，根据GJB151B-2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》，中RE102电场辐射发射核心管控频段（10kHz-1GHz），重点聚焦30MHz以上中高频电磁泄漏关键区间，在30MHz-1GHz频段内开展屏蔽效能仿真，对比新型结构与传统螺栓拼接结构的屏蔽性能差异，分析拼接间隙、密封件压缩量对屏蔽效能的影响规律。仿真结果表明，新型拼接结构在目标频段内屏蔽效能均优于55dB，满足一级抽拉扩展方舱电磁屏蔽指标要求，相较于传统结构平均提升18dB以上，且结构稳定性良好，适配抽拉扩展的动态使用需求。研究可为同类扩展方舱拼接部位的电磁屏蔽设计提供实用参考，兼具工程应用价值与技术创新性。

**【关键词】**：一级抽拉扩展方舱；电磁屏蔽；拼接结构；HFSS仿真；屏蔽效能

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.041

## 引言

当前一级抽拉扩展方舱的拼接结构多采用螺栓紧固配合简单导电衬垫的形式，该结构虽能满足基本的连接强度要求，但存在诸多不足。一方面，螺栓连接易产生装配间隙，且长期抽拉操作会导致衬垫老化、松动，破坏导电连续性，造成电磁泄漏；另一方面，传统拼接结构难以兼顾抽拉灵活性与屏蔽性能，过度追求密封效果会增加抽拉阻力，影响扩展操作的顺畅性，反之则会降低屏蔽效能。现有研究中，部分拼接结构通过优化啮合形式或更换屏蔽条提升性能，但仍存在屏蔽不连续、结构稳定性不足等问题，无法充分适配一级抽拉扩展方舱的动态使用场景。为解决上述问题，本文设计一种新型电磁屏蔽拼接结构，优化拼接方式与密封设计，通过三维建模与电磁仿真验证结构性能，明确结构参数对屏蔽效能的影响规律，为一级抽拉扩展方舱的电磁屏蔽优化设计提供技术支撑，助力提升方舱在复杂电磁环境下的适应能力。

## 1 电磁屏蔽原理与拼接结构设计要求

### 1.1 电磁屏蔽基本原理

电磁屏蔽的核心是通过阻挡、反射或吸收电磁波，切断电磁波的传播路径，从而减少电磁干扰的传播。对于金属材质方舱拼接结构，其屏蔽机制主要包括反射损耗与吸收损耗两部分。反射损耗源于电磁波在金属表面的阻抗不匹配，当电磁波入射到金属屏蔽层表面时，大部分能量被反射，减少电磁波穿透量；吸收损耗则是电磁波进入金属内部后，通过涡流损耗、磁滞损耗等形式将电磁能转化为热能，实现能量衰减。

拼接部位的缝隙是电磁泄漏的主要通道，缝隙处的导电连续性直接决定整体屏蔽效能。当缝隙宽度大于电磁波波长的1/200时，会产生明显的电磁泄漏，因此需通过优化拼接结构、填充导电密封材料，最大限度减小缝隙宽度，保证导电连续性，

提升屏蔽性能。

### 1.2 拼接结构设计要求

结合一级抽拉扩展方舱的使用特性，新型拼接结构需同时满足连接强度、抽拉灵活性与电磁屏蔽三大核心要求，具体如下。

1.连接强度要求：拼接结构需承受抽拉过程中的拉力、挤压力，长期使用无变形、松动，满足方舱户外作业的力学性能要求，适配振动、冲击等复杂工况；

2.抽拉灵活性要求：结构设计需减少抽拉过程中的摩擦阻力，确保方舱扩展与收缩顺畅，无卡顿现象，兼顾操作便捷性与结构稳定性；

3.电磁屏蔽要求：在30MHz-1GHz频段内，屏蔽效能需不低于50dB，满足一级方舱电磁兼容性标准，有效阻挡外部电磁干扰，防止舱内电磁信号泄漏；

4.工艺可行性要求：结构设计需简洁，便于加工制造与装配，材料选型兼顾性能与成本，适合批量生产与工程应用。

## 2 新型电磁屏蔽拼接结构设计

### 2.1 结构整体设计

新型拼接结构采用“榫卯插接+导电密封+快速锁止”的复合设计方案，适配一级抽拉扩展方舱的抽拉式结构，分为固定端与抽拉端两部分，固定端与方舱主体一体化成型，抽拉端与扩展舱体连接，通过榫卯结构实现精准定位与初步连接，再通过快速锁止机构紧固，缝隙处填充导电密封件，确保导电连续性与密封性能，兼顾抽拉灵活性与电磁屏蔽效果。

### 2.2 核心结构细节设计

#### 2.2.1 榫卯插接结构设计

榫卯结构采用阶梯式配合设计，避免传统平面拼接的间隙

问题,提升结构定位精度与导电连续性。固定端设置凸形榫头,抽拉端设置凹形榫槽,榫头与榫槽的配合间隙控制在0.05-0.1mm,既保证抽拉顺畅性,又减少电磁泄漏通道。榫头与榫槽表面均采用打磨处理,粗糙度控制在 $Ra \leq 1.6\mu m$ ,提升接触面的导电性能与配合精度。

为增强结构力学性能,榫头厚度设计为15mm,榫槽深度为16mm,预留1mm的密封件安装空间;榫卯结构的长度与方舱截面宽度一致,确保整体受力均匀,避免抽拉过程中出现结构变形。

### 2.2.2 导电密封设计

密封结构采用嵌入式设计,在榫槽内侧开设环形密封槽,尺寸为8mm×5mm(宽×深),填充SCS钢铜钢复合导电密封件。该密封件采用“高纯铜层+高强度钢基体”的层状结构,通过轧制复合工艺实现原子级冶金结合,兼具优异的导电性与弹性,避免传统铍铜簧片的健康风险与成本问题,压缩量可调节范围为0.5-2mm,适配榫卯结构的装配误差。密封件与榫卯接触面采用导电胶粘接,进一步提升导电连续性,防止缝隙处产生电磁泄漏;同时,密封件表面做防腐处理,提升户外环境适应性,延长使用寿命。

### 2.2.3 快速锁止机构设计

锁止机构采用分布式设计,沿拼接结构长度方向均匀布置4组棘轮棘爪锁止组件,间距为500mm,确保紧固力均匀。锁止组件包括滑动杆、转动杆、收卷辊与棘爪制动机构,通过收卷拉绳驱动滑动杆移动,带动转动杆旋转90°实现锁定,棘爪与棘轮啮合防止回退,避免长期使用出现松动;解锁时通过推杆推动棘爪脱离棘轮,操作便捷,适配方舱快速扩展与收缩的需求。

## 2.3 材料选型

结合结构性能要求与工程成本,各部件材料选型如下:拼接结构主体采用6063铝合金,该材料密度小、强度高、导电性优良,且加工性能好,适合批量制造,厚度为8mm;榫卯结构与方舱壳体一体化成型,表面进行阳极氧化处理,提升防腐性能与表面硬度;屏蔽夹层采用1mm厚坡莫合金,铺设于拼接结构内侧,增强低频电磁波的吸收损耗;锁止机构部件采用45号钢,经调质处理提升力学性能;导电密封件选用SCS复合材料,导电胶选用银系导电胶,确保导电性能。

表1 新型拼接结构各部件材料及性能参数

部件名称	材料型号	厚度/尺寸	核心性能参数
主体结构	6063 铝合金	8mm	抗拉强度 $\geq 310MPa$ , 导电率 $\geq 36\%IACS$
屏蔽夹层	坡莫合金	1mm	磁导率 $\geq 1000\mu H/m$ , 屏蔽效能 $\geq 80dB$

导电密封件	SCS 复合材料	8mm×5mm	导电率 $\geq 58\%IACS$ , 压缩回弹率 $\geq 85\%$
锁止机构	45 号钢	定制	抗拉强度 $\geq 600MPa$ , 耐磨性能优良
导电胶	银系导电胶	0.1mm	体积电阻率 $\leq 1 \times 10^{-4}\Omega \cdot cm$

## 2.4 传统结构与新型结构对比

为凸显新型结构的优势,将其与传统螺栓拼接结构进行对比,对比指标包括拼接方式、屏蔽效能、抽拉灵活性、结构稳定性等,具体如下表所示。

表2 传统螺栓结构与新型拼接结构对比

对比指标	传统螺栓拼接结构	新型榫卯密封拼接结构
拼接方式	螺栓紧固, 平面贴合	榫卯插接+快速锁止, 阶梯式贴合
配合间隙	0.2-0.3mm	0.05-0.1mm
屏蔽效能	30-40dB	$\geq 55dB$
抽拉灵活性	较差, 螺栓拆卸繁琐	优良, 快速锁止解锁, 阻力小
结构稳定性	易松动, 长期使用变形	稳定可靠, 受力均匀, 抗变形
装配效率	较低, 螺栓逐一紧固	较高, 模块化装配, 快速锁止
维护成本	较高, 需定期更换衬垫、紧固螺栓	较低, 密封件寿命长, 结构不易损坏

## 3 性能仿真验证

### 3.1 仿真模型建立

采用HFSS电磁仿真软件搭建一级抽拉扩展方舱拼接结构的三维电磁仿真模型,结合方舱实际尺寸,模型整体尺寸为3000mm×2000mm×1500mm(长×宽×高),拼接结构按本文设计参数建模,包括榫卯结构、导电密封件、坡莫合金屏蔽夹层与锁止机构,简化锁止机构的非导电部件,重点模拟导电部分的电磁特性。

模型材料参数设置严格按照表1执行,6063铝合金设置为理想导体,坡莫合金与SCS密封件按实际电磁参数赋值,导电胶忽略厚度影响,视为理想导电连接。仿真边界条件设置为辐射边界,距离模型表面50mm,避免边界反射对仿真结果产生干扰;激励源采用平面波激励,入射方向垂直于拼接结构表面,极化方式为垂直极化,频率范围设置为30MHz-1GHz,覆盖方舱常用工作频段。

仿真过程中,分别搭建传统螺栓拼接结构与新型拼接结构的仿真模型,保持模型尺寸、材料、激励条件一致,确保对比结果的准确性;同时,针对新型结构,设置不同拼接间隙(0.05mm、0.1mm、0.15mm)与密封件压缩量(0.5mm、1mm、1.5mm、2mm),分析参数对屏蔽效能的影响。

### 3.2 仿真结果分析

#### 3.2.1 两种结构屏蔽效能对比

两种结构在 30MHz-1GHz 频段内的屏蔽效能仿真结果如图 2 所示, 选取典型频率点的屏蔽效能数值进行对比, 具体如下表所示。

表 3 典型频率点两种结构屏蔽效能对比 (单位: dB)

频率 (MHz)	传统螺栓结构	新型拼接结构	提升幅度
30	32.5	56.3	23.8
100	35.2	58.7	23.5
300	37.8	61.2	23.4
500	38.5	62.1	23.6
800	39.2	63.5	24.3
1000	39.8	64.2	24.4
平均	37.2	61.0	23.8

由仿真结果可知, 传统螺栓拼接结构在目标频段内的屏蔽效能为 32.5-39.8dB, 平均 37.2dB, 无法满足一级方舱 $\geq 50$ dB 的屏蔽要求; 新型拼接结构的屏蔽效能为 56.3-64.2dB, 平均 61.0dB, 均满足一级屏蔽指标, 相较于传统结构平均提升 23.8dB, 屏蔽性能提升显著。

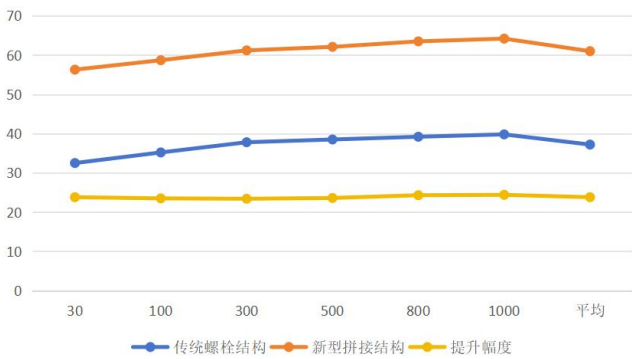


图 1 屏蔽效能对比折线图

从频率变化规律来看, 两种结构的屏蔽效能均随频率升高而略有提升, 这是因为高频电磁波的波长更短, 金属材料的反射损耗与吸收损耗均有所增加。新型结构的屏蔽效能随频率变化更平缓, 稳定性更好, 主要得益于榫卯结构的阶梯式配合与 SCS 密封件的优异导电性能, 有效减少了缝隙处的电磁泄漏, 提升了整体屏蔽稳定性。

#### 3.2.2 结构参数对屏蔽效能的影响

##### (1) 拼接间隙的影响

保持密封件压缩量为 1mm, 改变拼接间隙, 仿真结果表明, 随着拼接间隙增大, 新型结构的屏蔽效能逐渐下降。当间隙为

0.05mm 时, 屏蔽效能平均为 63.5dB; 间隙增大至 0.1mm 时, 屏蔽效能平均为 61.0dB, 下降幅度较小; 当间隙增大至 0.15mm 时, 屏蔽效能平均降至 52.3dB, 接近一级屏蔽指标下限。因此, 拼接间隙需严格控制在 0.1mm 以内, 确保屏蔽性能。

##### (2) 密封件压缩量的影响

保持拼接间隙为 0.1mm, 改变密封件压缩量, 仿真结果表明, 随着压缩量增大, 屏蔽效能先提升后趋于稳定。当压缩量为 0.5mm 时, 屏蔽效能平均为 57.2dB; 压缩量增至 1mm 时, 屏蔽效能平均为 61.0dB; 压缩量继续增至 1.5mm 与 2mm 时, 屏蔽效能分别为 62.8dB 与 63.1dB, 提升幅度明显减小。综合考虑屏蔽性能与抽拉阻力, 密封件最优压缩量确定为 1-1.5mm。

### 3.3 仿真结论

通过 HFSS 仿真验证可知, 新型榫卯插接+导电密封拼接结构的电磁屏蔽性能优于传统螺栓拼接结构, 在 30MHz-1GHz 频段内屏蔽效能均满足一级抽拉扩展方舱的指标要求; 拼接间隙与密封件压缩量对屏蔽效能有显著影响, 合理控制参数可实现屏蔽性能与抽拉灵活性的最优平衡。该结构设计合理, 兼具良好的电磁屏蔽性能与结构稳定性, 适配一级抽拉扩展方舱的动态使用需求。

### 3.4 讨论与展望

本文设计的新型电磁屏蔽拼接结构, 通过榫卯结构优化配合精度、SCS 密封件提升导电连续性、快速锁止机构兼顾操作便捷性, 有效解决了传统拼接结构屏蔽效能不足、稳定性差、抽拉不便的问题, 仿真结果验证了结构的可行性与优越性。该结构采用模块化设计, 加工装配便捷, 材料选型兼顾性能与成本, 适合工程批量应用, 可广泛推广至一级抽拉扩展方舱及同类扩展式设备的电磁屏蔽设计中。随着电磁环境的日益复杂, 一级抽拉扩展方舱的电磁屏蔽要求将不断提高, 未来可结合新型屏蔽材料 (如石墨烯屏蔽涂料) 与智能化设计, 开发兼具电磁屏蔽、振动缓冲、防腐防护等多功能的拼接结构, 助力提升方舱的综合性能, 适配更多复杂作业场景的使用需求。

### 4 结论

针对一级抽拉扩展方舱拼接部位电磁屏蔽不足的问题, 本文完成了新型电磁屏蔽拼接结构的设计与性能仿真验证。设计的榫卯插接+导电密封+快速锁止复合式拼接结构, 解决了传统结构拼接间隙大、导电不连续的问题, 兼顾了连接强度、抽拉灵活性与电磁屏蔽性能, 结构设计合理, 工艺可行性强; 新型结构选用 6063 铝合金主体、坡莫合金屏蔽夹层与 SCS 导电密封件, 通过优化结构参数, 拼接间隙控制在 0.05-0.1mm, 密封件最优压缩量为 1-1.5mm, 可实现良好的屏蔽效果; HFSS 仿真结果表明, 新型结构在 30MHz-1GHz 频段内的屏蔽效能为 56.3-64.2dB, 平均 61.0dB, 相较于传统螺栓结构平均提升 23.8dB, 满足一级抽拉扩展方舱的电磁屏蔽指标要求; 拼接间

隙增大导致屏蔽效能下降，密封件压缩量提升可改善屏蔽性能，但达到一定程度后提升效果趋缓，合理控制结构参数可实现性能最优。

### 参考文献:

- [1] 程明,辛吉,尹春明,等.方舱舱门电磁屏蔽材料设计及屏蔽效能分析[J].科技与创新,2025,(06):91-94.
- [2] 吴博,余波,夏磊,等.电磁屏蔽方舱设计规范[J].新技术新工艺,2023,(09):44-48.
- [3] 张超,王伟利,王乐铖,等.方舱电磁屏蔽材料的发展现状和未来趋势[J].广东交通职业技术学院学报,2023,22(03):66-68+78.
- [4] 王卓显,彭浩宸.电磁屏蔽方舱孔口结构设计及工艺控制[J].新技术新工艺,2023,(03):24-27.
- [5] 姜波波.方舱车通讯接口窗电磁屏蔽效能测试方法研究[J].内燃机与配件,2022,(24):100-102.