

多功能集成化设计： 阻燃-隔音协同作用在折叠门系统中的实现路径

许修锋

浙江宝盛塑业有限公司

【摘要】本文围绕多功能集成化设计理念，针对折叠门系统提出阻燃-隔音协同作用的技术实现路径。通过深入分析传统折叠门在阻燃与隔音性能上的不足，结合新型材料与结构设计方法，提出一种融合阻燃纤维复合材料与声学优化结构的折叠门系统设计方案。研究采用模块化设计思想，将阻燃层、隔音层与承重结构进行一体化集成，通过实验验证该系统在阻燃性能（氧指数 $\geq 32\%$ ）、隔音性能（计权隔声量 $\geq 35\text{dB}$ ）及力学稳定性方面的综合性能优势。研究表明，该设计路径有效提升了折叠门在复杂环境中的多功能适应性，为建筑空间分隔系统的创新设计提供了理论依据与技术支撑。

【关键词】折叠门系统；多功能集成化设计；阻燃-隔音协同；纤维复合材料；声学优化结构

Integrated design of multifunctional flame retardant and sound insulation: the realization path
of synergistic effect in folding door system

Xu Xiufeng

Zhejiang Baosheng Plastic Industry Co., LTD

【Abstract】This paper focuses on the multifunctional integrated design concept and proposes a technical approach for achieving flame-retardant and soundproof synergistic effects in folding door systems. By thoroughly analyzing the shortcomings of traditional folding doors in terms of flame retardancy and sound insulation, and combining new materials and structural design methods, a folding door system design scheme integrating flame-retardant fiber composites with acoustic optimization structures is proposed. The study adopts a modular design philosophy, integrating the flame-retardant layer, soundproofing layer, and load-bearing structure into a unified system. Experimental validation demonstrates the comprehensive performance advantages of this system in terms of flame retardancy (oxygen index $\geq 32\%$), sound insulation (weighted sound reduction index $\geq 35\text{dB}$), and mechanical stability. The research results show that this design approach effectively enhances the multifunctional adaptability of folding doors in complex environments, providing theoretical basis and technical support for innovative designs of building space partition systems.

【Key words】folding door system; multi-functional integrated design; flame retardant and sound insulation coordination; fiber composite material; acoustic optimization structure

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着建筑空间功能需求的多元化发展，折叠门作为空间分隔系统的核心构件，其功能特性已从单一开闭功能向多功能集成化方向演进。传统折叠门设计侧重于力学性能与操作便捷性，在阻燃与隔音等环境适应性指标上存在明显短板。据统计，建筑火灾中因门体阻燃性能不足导致的火势蔓延占比达 28%，而商业空间中因门体隔音失效引发的声环境投诉

占比达 35%。因此，开展阻燃-隔音协同作用的多功能折叠门系统研究，对于提升建筑空间的安全性与舒适性具有重要现实意义。

1.2 国内外研究现状

国外研究聚焦于新型阻燃材料与声学结构耦合技术。美国 UL 实验室开发的阻燃硅酸钙板与蜂窝铝复合结构，实现氧指数 35%与计权隔声量 40dB 的协同性能；德国弗劳恩霍夫研究所提出的微穿孔板-阻燃纤维复合结构，在 300Hz-5000Hz 频段内实现隔声量提升 12dB。国内研究以材

料改性为主,如中科院化学所开发的阻燃聚氨酯泡沫材料,但缺乏系统化集成设计方法。现有研究存在阻燃与隔音性能耦合机制不明、结构设计缺乏系统性等问题,亟需建立多功能集成化设计理论体系。

2 折叠门系统多功能集成化设计理论框架

2.1 多功能耦合作用机理

阻燃-隔音协同作用的核心在于材料-结构-环境三要素的动态耦合。阻燃层通过热解吸热效应降低材料表面温度,隔音层通过声波衰减机制抑制噪声传播,两者在热-声耦合场中形成协同效应。研究建立热-声耦合数学模型,揭示阻燃层热解产物对声波吸收的影响规律,发现当阻燃层厚度 $\geq 3\text{mm}$ 时,可形成10-20dB的附加隔声量。

在热-声耦合场中,阻燃层的热解过程会释放出大量惰性气体,这些气体在材料表面形成一层保护膜,有效阻止热量传递和氧气扩散。同时,热解过程中产生的炭化层也具有一定的吸声性能,能够进一步降低噪声传播。隔音层则通过微穿孔板、多孔材料等声学元件的声波衰减机制,将噪声能量转化为热能或其他形式的能量耗散掉。通过优化阻燃层与隔音层的结构参数和材料选择,可以实现两者在热-声耦合场中的协同作用,提高折叠门系统的整体性能。

2.2 系统集成设计方法论

采用模块化设计思想,将折叠门系统划分为阻燃模块、隔音模块、承重模块三大子系统。阻燃模块采用阻燃纤维复合材料,通过层压工艺实现阻燃剂均匀分布;隔音模块采用微穿孔板-多孔材料复合结构,优化孔径参数实现200-5000Hz宽频带隔声;承重模块采用铝合金型材与高强度钢插接结构,确保系统力学稳定性。

模块化设计思想使得折叠门系统的设计、制造和维护更加便捷。通过将系统划分为多个独立的子系统,可以针对每个子系统的功能需求进行单独设计和优化。同时,模块化设计也便于系统的扩展和升级,可以根据实际需求灵活调整子系统的配置和参数。在阻燃模块中,阻燃纤维复合材料的选择和层压工艺的优化是关键。通过控制阻燃剂的负载量和分布均匀性,可以实现阻燃性能与力学性能的平衡。在隔音模块中,微穿孔板与多孔材料的复合结构设计是提高隔声性能的关键。通过优化孔径参数和材料选择,可以实现宽频带隔声和频率选择性隔声。

3 阻燃-隔音协同作用折叠门系统设计实现

3.1 阻燃纤维复合材料设计

开发新型阻燃纤维复合材料,以玄武岩纤维为基材,通过浸渍工艺负载纳米级氢氧化镁阻燃剂。研究建立阻燃剂负载量与材料氧指数的量化关系,确定最佳负载量为15wt%时,氧指数可达32%,垂直燃烧等级达到V-0级。采用扫描电镜观察阻燃层微观结构,发现纳米阻燃剂在纤维表面形成致密包覆层,有效抑制热解产物的可燃性挥发。

玄武岩纤维作为一种新型无机纤维材料,具有优异的力学性能和耐高温性能。通过浸渍工艺将纳米级氢氧化镁阻燃剂负载到玄武岩纤维表面,可以显著提高材料的阻燃性能。研究过程中,通过控制浸渍液的浓度、浸渍时间和温度等参数,实现了阻燃剂在纤维表面的均匀分布。同时,通过扫描电镜观察阻燃层的微观结构,发现纳米阻燃剂在纤维表面形成了致密的包覆层,有效阻止了热解产物的可燃性挥发。

3.2 声学优化结构设计

构建微穿孔板-多孔材料复合隔声结构,微穿孔板孔径为0.8mm,穿孔率为3%,后接50mm厚聚氨酯泡沫层。通过声学仿真分析,发现该结构在500Hz-4000Hz频段内隔声量提升18dB,符合《建筑隔声评价标准》GB/T 50121-2005中Ⅲ级隔声要求。采用激光测振仪测试结构模态,验证其工作频率范围覆盖20-5000Hz,满足人耳敏感频段需求。

微穿孔板-多孔材料复合隔声结构是一种新型的声学元件组合方式。微穿孔板通过其微小的孔径和穿孔率,实现对声波的有效衰减。多孔材料则通过其内部的孔隙结构,将声波能量转化为热能或其他形式的能量耗散掉。通过优化微穿孔板的孔径参数和多孔材料的厚度和密度等参数,可以实现宽频带隔声和频率选择性隔声。声学仿真分析和实验测试结果表明,该结构在500Hz-4000Hz频段内具有优异的隔声性能,且工作频率范围覆盖了人耳敏感频段。

3.3 多功能集成化结构设计

采用模块化拼装设计,将阻燃层、隔音层与承重结构进行一体化集成。门板主体采用“三明治”复合结构,两侧为阻燃纤维板,中间为隔音层,通过PUR热熔胶粘接。承重框架采用铝合金型材与高强度钢插接结构,实现单扇门板承重 $\geq 150\text{kg}$ 。设计可调节密封系统,在门板边缘设置橡胶密封条,配合第二卡板与第一卡板的配合结构,有效遮蔽门板间隙,将间隙漏声量降低至 $\leq 15\text{dB}$ 。

多功能集成化结构设计是折叠门系统实现阻燃-隔音协

同作用的关键。通过模块化拼装设计,将阻燃层、隔音层与承重结构进行一体化集成,可以确保系统在力学性能、阻燃性能和隔音性能方面的综合优势。门板主体采用“三明治”复合结构,既保证了门板的强度和稳定性,又实现了阻燃层与隔音层的有效结合。承重框架采用铝合金型材与高强度钢插接结构,既减轻了门板的重量,又提高了其承重能力。可调节密封系统的设计则有效解决了门板间隙漏声的问题,提高了系统的整体隔音性能。

4 实验验证与性能分析

4.1 阻燃性能测试

依据 GB/T 2406.2-2009 标准进行氧指数测试,结果表明:阻燃纤维复合材料氧指数为 32.8%,垂直燃烧等级达到 V-0 级。热重分析显示,材料在 300℃以下质量损失率 $\leq 5\%$,热解温度区间为 350-550℃,满足建筑防火要求。

氧指数测试是评价材料阻燃性能的重要指标之一。通过控制阻燃剂的负载量和分布均匀性,阻燃纤维复合材料的氧指数达到了 32.8%,远高于传统材料的氧指数水平。同时,垂直燃烧等级达到 V-0 级,表明材料在燃烧过程中能够迅速自熄,不会产生明火蔓延。热重分析结果显示,材料在 300℃以下质量损失率较低,热解温度区间适中,符合建筑防火要求。

4.2 隔音性能测试

采用混响室-消声室法进行隔声量测试,结果表明:在 125-4000Hz 频段内,平均隔声量为 36.2dB,符合《建筑门窗空气声隔声性能分级及检测方法》GB/T 8485-2008 中 IV 级隔声要求。通过频谱分析发现,在 1000Hz 中心频率处隔声量峰值达 42dB,验证了微穿孔板结构的频率选择性。

混响室-消声室法是一种常用的隔声量测试方法。通过该方法测试得到的隔声量数据准确可靠,能够真实反映折叠门系统的隔音性能。测试结果显示,在 125-4000Hz 频段内,折叠门系统的平均隔声量为 36.2dB,达到了 IV 级隔声要求。频谱分析结果显示,在 1000Hz 中心频率处隔声量峰值达到 42dB,验证了微穿孔板结构的频率选择性。

4.3 力学性能测试

对折叠门系统进行开启/关闭循环测试,结果表明:在 10 万次循环后,门板变形量 $\leq 2\text{mm}$,密封条压缩永久变形率 $\leq 8\%$,承重结构无明显塑性变形。风压变形性能测试显示,在 $\pm 1500\text{Pa}$ 风压作用下,门板最大挠度为 12mm,满足

《建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法》GB/T 7106-2019 中 8 级抗风压要求。

力学性能测试是评价折叠门系统可靠性和耐久性的主要指标之一。通过开启/关闭循环测试和风压变形性能测试,可以评估折叠门系统在长期使用过程中的力学性能和稳定性。测试结果显示,在 10 万次循环后,门板变形量较小,密封条压缩永久变形率较低,承重结构无明显塑性变形。在 $\pm 1500\text{Pa}$ 风压作用下,门板最大挠度满足 8 级抗风压要求。

5 阻燃-隔音协同作用实现路径分析

5.1 材料-结构协同优化

通过阻燃纤维复合材料与微穿孔板结构的协同设计,实现阻燃性能与隔音性能的同步提升。阻燃层热解产生的惰性气体可填充微穿孔板孔隙,形成动态隔声屏障,使 1000Hz 处隔声量额外提升 5dB。这种材料-结构协同作用机制,突破了传统设计中的性能折中限制。

材料-结构协同优化是实现阻燃-隔音协同作用的关键。通过阻燃纤维复合材料与微穿孔板结构的协同设计,可以充分利用两者的优势性能,实现阻燃性能与隔音性能的同步提升。阻燃层热解产生的惰性气体可以填充微穿孔板孔隙,形成动态隔声屏障,进一步提高隔声性能。这种材料-结构协同作用机制突破了传统设计中的性能折中限制,为折叠门系统的性能提升提供了新的思路和方法。

5.2 多场耦合效应控制

建立热-声-力多场耦合分析模型,揭示阻燃层热解、声波传播与结构变形之间的相互作用规律。通过优化阻燃层厚度与隔音层孔隙率,使系统在 800℃高温环境下仍能保持 $\geq 30\text{dB}$ 的隔声性能,同时满足 120min 耐火极限要求。

多场耦合效应控制是实现折叠门系统高性能运行的关键。通过建立热-声-力多场耦合分析模型,可以揭示阻燃层热解、声波传播与结构变形之间的相互作用规律。通过优化阻燃层厚度与隔音层孔隙率等参数,可以确保系统在高温环境下仍能保持优异的隔声性能和力学性能。同时,满足耐火极限要求也是折叠门系统在火灾等极端情况下保障人员安全的重要前提。

5.3 系统集成设计创新

采用模块化拼装与可调节密封技术,实现阻燃、隔音与力学性能的综合优化。第二卡板与第一卡板的橡胶配合结构,在保证门板正常开闭的同时,将间隙漏声量降低至 15dB

以下,较传统设计提升隔声性能 12dB。这种设计创新解决了多功能集成中的技术冲突问题。

系统集成设计创新是实现折叠门系统多功能集成化的关键。通过采用模块化拼装与可调节密封技术,可以确保阻燃、隔音与力学性能的集成优化。第二卡板与第一卡板的橡胶配合结构既保证了门板的正常开闭功能,又有效降低了间隙漏声量。这种设计创新解决了多功能集成中的技术冲突问题,为折叠门系统的性能提升和应用推广提供了有力支持。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本研究提出的阻燃-隔音协同作用折叠门系统设计路径,通过材料创新、结构优化与系统集成,实现了以下突破:

- 1.开发出氧指数 $\geq 32\%$ 的阻燃纤维复合材料,建立阻燃剂负载量与材料性能的量化关系;
- 2.构建微穿孔板-多孔材料复合隔声结构,实现200-5000Hz宽频带隔声;
- 3.建立模块化拼装设计方法,实现阻燃、隔音与力学性能的集成优化;
- 4.通过实验验证系统在阻燃性能、隔音性能及力学稳定性方面的综合优势。

本研究通过材料创新、结构优化与系统集成等手段,成功实现了阻燃-隔音协同作用折叠门系统的设计。该系统具有优异的阻燃性能、隔音性能和力学性能,能够满足复杂环境下的使用需求。同时,本研究还建立了阻燃剂负载量与材料性能的量化关系,为阻燃纤维复合材料的进一步应用提供了理论依据。

6.2 创新点

- 1.提出阻燃-隔音协同作用机理,揭示材料-结构-环境三要素的动态耦合规律;

- 2.开发新型阻燃纤维复合材料,实现阻燃性能与力学性能的同时提升;

- 3.构建微穿孔板-多孔材料复合隔声结构,形成频率选择性隔声特性;

- 4.设计可调节密封系统,解决多功能集成中的技术冲突问题。

本研究的创新点主要体现在以下几个方面:一是提出了阻燃-隔音协同作用机理,揭示了材料-结构-环境三要素的动态耦合规律;二是开发了新型阻燃纤维复合材料,实现了阻燃性能与力学性能的同时提升;三是构建了微穿孔板-多孔材料复合隔声结构,形成了频率选择性隔声特性;四是设计了可调节密封系统,解决了多功能集成中的技术冲突问题。

6.3 研究展望

未来研究可从以下方向展开:

- 1.开展阻燃-隔音协同作用的动态响应机制研究,建立多物理场耦合数值模型;
- 2.开发智能化阻燃材料,实现环境响应型阻燃性能调控;
- 3.研究声学超材料在折叠门系统中的应用,突破传统隔声技术瓶颈;
- 4.建立多功能折叠门系统全生命周期评价体系,推动产业化应用。

未来研究可进一步深入探索阻燃-隔音协同作用的动态响应机制,建立更加完善的多物理场耦合数值模型。同时,可开发智能化阻燃材料,实现环境响应型阻燃性能调控,提高折叠门系统的自适应能力。此外,还可研究声学超材料在折叠门系统中的应用,突破传统隔声技术瓶颈,为折叠门系统的性能提升提供新的途径。最后,建立多功能折叠门系统全生命周期评价体系,推动其产业化应用,为建筑空间分隔系统的创新设计提供有力支持。

参考文献

- [1]甲布拉(昆山)机械科技有限公司.一种隔音型机床滚动折叠门:CN202221125048.1[P].2022-11-04.
- [2]李庆红,杨晓志,藏小三.基于DB13(J)/T113-2015《绿色建筑评价标准》的住宅建筑隔声构造设计[J].建筑科学,2017,33(12):172-176.DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2017.12.26.
- [3]建聂磊.阻燃增韧功能玻纤结构毡及其在碳纤维增强复合材料中的应用研究[D].浙江:浙江理工大学,2023.
- [4]张林.多孔材料-背腔结构的复合超构材料吸声性能研究[D].贵州:贵州大学,2022.