

纤维材料应用与复合墙板设计的研究进展

王 晨, 孙洪军, 李泽辉, 李永涛, 李 爽

(辽宁工业大学 土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 为了有效解决传统复合墙板强度低、整体性差的问题, 研究者们开展了大量研究, 发现纤维材料是增强复合墙板性能的一种有效方法。通过不同的呈现形式, 纤维材料能够分别对墙板的各项性能进行优化和提升。本文基于查阅的大量文献, 重点介绍了不同形式纤维材料在增强复合墙板中的具体应用及其影响, 并结合复合墙板的设计特点, 提出了建设性意见与未来展望。结果表明: 1) 单丝纤维可缓解墙板材料中轻质与高强之间的矛盾, 提升多项性能; 织物纤维在墙体加固方面具有显著明显; 棒状纤维主要解决墙板的结构强度和整体性问题; 2) 墙板设计需要综合考虑多方面的因素, 将规范和经验数据相结合; 3) 夹芯、带肋和芯柱式结构各具优势; 4) 材料选择应兼顾面板和核心的不同需求, 从而实现复合墙板高性能的目标。本文成果可为复合墙板的实际应用提供参考与支持。

关键词: 墙板; 复合墙板; 纤维材料; 材料应用; 复合墙板设计

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)07-0020-09

doi:10.13402/j.gcjs.2025.07.084

Research progress in application of fiber materials and design of composite wallboards

WANG Chen, SUN Hongjun, LI Zehui, LI Yongtao, LI Shuang

(College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract: In order to effectively solve the problem of low strength and poor integrity of traditional composite wallboards, researchers have carried out a lot of studies and found that fiber materials are an effective way to enhance the performance of composite wallboards. Through different presentations, the fiber material can optimize and improve the performance of the wallboards. Based on a large number of literatures, the specific applications and influences of different forms of fiber materials in reinforced composite wallboards are focused on, and constructive suggestions and future prospects are proposed based on the design characteristics of composite wallboards. The results show that: 1) Monofilament fibers can alleviate the contradiction between lightweight and high strength in wallboard materials and improve multiple performances; fabric fibers are significantly obvious in wall reinforcement; rod-shaped fibers mainly solve the structural strength and integrity of wallboards; 2) Wallboards design needs to comprehensively consider multiple factors and combine specifications and empirical data; 3) Sandcore, ribbed and core-type structures have advantages; 4) Material selection should take into account the different needs of the panel and core, so as to achieve the goal of high performance of composite wallboards. The results can provide reference and support for the practical application of composite wallboards.

Key words: wall panel; composite wallboard; fibrous materials; material application; composite wall panel design

近年来, 随着纤维材料增强复合墙板 (composite wall panel, CWP) 的研究逐步深入, 其复合效应日益显著, 并受到市场的广泛关注。然而, 在纤维材料于 CWP 中的具体应用方面, 目前

收稿日期: 2024-11-14

作者简介: 王 晨(1999—), 男, 硕士研究生, 从事装配式轻质复合墙板方面的研究。

通信作者: 孙洪军(1973—), 男, 教授, 从事装配式轻质复合墙板方面的研究。

的相关研究仍较为零散。本文通过整合近几年的文献数据, 围绕纤维材料的不同呈现形式展开分析, 分别介绍其在 CWP 中的应用及其增强作用, 并结合 CWP 的设计特点总结各类墙板的设计方法, 最后根据现阶段智能建造的发展趋势, 对纤维材料增强复合墙板的应用前景进行展望, 以期更好地推广应用复合墙板提供借鉴与参考。

1 不同呈现形式纤维材料的应用与增强作用

现如今, 纤维已经成为各行各业中不可或缺的一种材料。它凭借自身独有的特性改善或增强产品的功能, 使其价值得到充分利用和体现。在装配式建筑领域中尤为如此, 特别是在 CWP 方面纤维材料的使用非常普遍, 主要表现为多种形式(图 1), 从而在不同层面上解决 CWP 存在的问题。

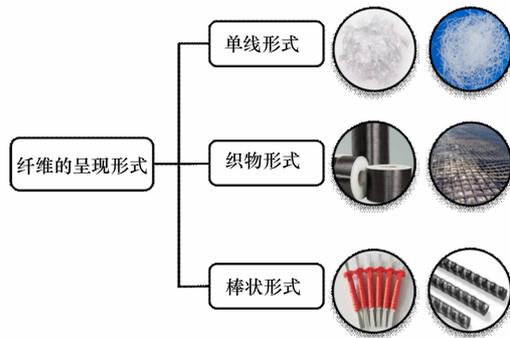


图 1 纤维的呈现形式

1.1 单丝形式

单丝纤维在增强 CWP 方面主要解决基体的轻质与高强问题。轻质与高强在材料上本是一种矛盾(主要体现在混凝土结构上的缺点^[1])。在实际的墙板设计中, 高水平的复合材料通常被制成更

轻(即更高效的结构)的面板, 但其代价往往是越来越多的热弯^[2-3]和热效率降低(特别是在使用钢连接器时)等问题。这种权衡导致一些设计师更偏向于较重但弯曲风险最小的低复合作用墙^[4]。

然而, 近年来随着对纤维混凝土的深入研究, 纤维在混凝土中的“桥接”与增强作用^[5]逐渐被认为是缓解这一矛盾的关键。为此, 一些学者根据先前研究所积累的经验, 迅速将其推广到建筑物或构筑物的具体构件当中(如梁^[6-7]、柱^[8-9]、剪力墙^[10-11]等), 以研究小块试件无法体现或研究的性能。表 1 以 CWP 为对象, 分领域整理了近年来的相关研究成果。需注意的是, 表中所示的合适纤维掺量应考虑其适用性, 所引起材料的变化也需做出相应的适配调整, 从而达到预期效果。

1.2 织物形式

织物形式的纤维材料(纤维布与纤维格栅)主要由众多单丝纤维通过纺纱、织造等工艺聚合、交织而成, 作为一种新型材料, 广泛应用于墙体加固领域。墙体是建筑中暴露于外界环境面积最大的构件^[18], 长期遭受风吹雨打等自然因素侵蚀, 容易出现饰面脱落、开裂、冷桥等问题, 从而提前进入维护加固阶段, 而这一阶段在目前既有建筑中表现得尤为突出。

装配式建筑作为绿色建筑的典型代表, 在我国既有建筑领域已形成一定规模, 其墙板的维护与加固需从传统建筑中汲取经验。传统建筑中墙体加固方法大致可分为 3 类: 增大构件截面、增加共同受力元件和使用新型材料法^[19], 具体方法与优缺点如图 2 所示。由图 2 可知: 粘贴纤维复

表 1 有关单丝纤维在 CWP 上的研究汇总

研究领域	研究成果	文献
单丝纤维对 CWP 抗压性能的提升	在泡沫混凝土中, 聚丙烯纤维的最佳掺量为 2.0 kg/m^3 与未掺纤维的 CWP 相比, 其抗压强度提升了 76.08%, 受压韧性指数提高了 30.03%	[12]
单丝纤维对 CWP 抗弯性能的提升	在泡沫混凝土中对聚丙烯纤维与天然纤维的掺入进行对比后发现, 掺入 1% 的天然纤维可以获得更好的能量吸收效果 在轻质混凝土墙板中掺入 1.5% 的聚乙烯醇纤维, 可使墙板抗弯强度提升至原来的 2.5 倍	[13], [14] [15]
单丝纤维对 CWP 抗震性能的提升	在陶粒混凝土中掺入耐碱玻璃纤维, 其最佳掺量为 0.3%。此时, CWP 在迟滞、延性、能耗等各项抗震指标上表现出色 在混凝土中掺入绿色纤维(回收钢纤维), 以纤维掺量和纤维掺入高度为变量, 结果表明: 墙板的极限承载力、延性和耗能能力随着纤维掺量的增加而逐渐提高。	[16] [17]

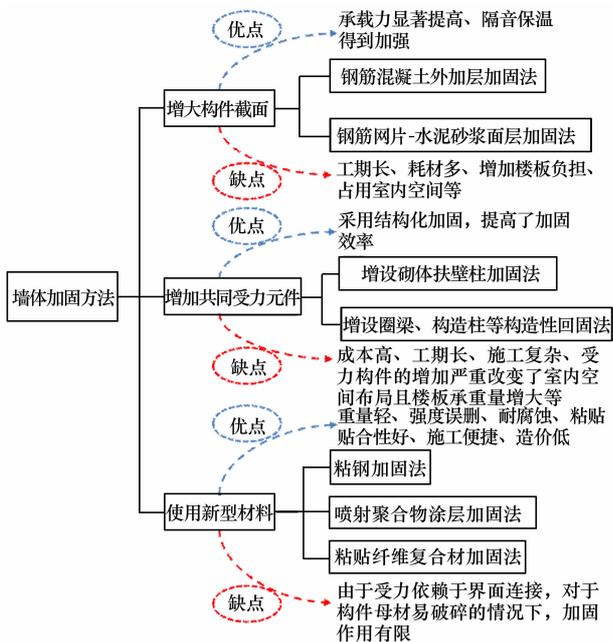


图 2 墙体加固的方法

合材加固法最适用于装配式墙板。该方法原理：通过黏结界面传递应力，控制被加固构件裂缝的扩展，从而实现共同受力的效果^[20]。早实际应用中，已有学者给出了相关实例研究。

在传统建筑墙体修复方面，CORRADI 等^[21]提出了一种创新的技术，即将 GFRP 网格插入无机基质中形成护套。该法不仅有效提升了墙体承载能力，还解决了传统钢筋加固中存在的问题，如钢筋锈蚀、刚度过大以及工作可逆性有限等。此外，该方法同样适用于解决 CWP 饰面脱落的问题，但纤维网格的位置有所不同：一种是纤维网格平铺于饰面层内以提高墙板抗弯性能^[22]；另一种则是纤维网格竖向内嵌于墙板内以连接结构层与保温层，从而提高其剪切性能^[23-25]。

纤维布的使用相较于纤维网格更加便捷且成熟，通常贴附于构件表面。具体应用时需注意粘贴层数与效率，以及粘贴方式与位置的选择。关于粘贴层数与效率，早期针对砌体墙上的研究已较为成熟，结合 CWP 上的应用结果表明：单层粘贴时效率最高，多层叠加的效果虽优于单层，但需要采取锚固和抗剪加固等措施以防止粘结失效^[19,26-27]。至于粘贴方式与位置，常见的粘贴方式包括平行、对角、交叉 3 种。其中，平行粘贴多用于墙板局部破坏较小的区域，而后两者则主要用于墙板的整体加固。在对比后两种方式对墙

板性能提升的效果时发现，交叉粘贴方式优于对角粘贴方式^[28]。

此外，由于空间连接的需求，墙板开孔或开洞在所难免，而孔洞的出现会对墙板原有的受力平衡造成显著影响。在这种情况下，纤维布依然是最佳的加固选择。具体粘贴位置：单层时，沿开口角 45° 粘贴效果优于沿开口方向^[29] 粘贴；双层时，第一层应沿开口角 45° 粘贴，随后沿开口粘贴发挥双层叠加效应^[30]，即 45° 与 90° 的组合^[31]。

1.3 棒状形式

棒状形式的纤维材料常见的有纤维筋与纤维连接件两种，分别用于解决 CWP 强度低和整体性差的问题。纤维筋是一种可替代钢筋的绿色建材，其弹性模量远低于钢筋^[32]，抗拉强度却高于钢筋两倍^[33]。当含有纤维筋的 CWP 受弯时，能够表现出更高的挠度和裂缝宽度^[34]、更大的承载力与刚度^[35]。此外，纤维筋与单丝纤维的组合使用在抗弯混凝土构件中具有潜力^[36]。然而需要注意的是，纤维筋的破坏形式为脆性破坏，且破坏前没有屈服阶段^[37]，因此在实际墙板设计中需留有足够的安全储备。CWP 的结构性能取决于单个面板的刚度与强度，以及它们通过穿透保温层的剪切连接件所形成的复合作用^[38]。纤维连接件由纤维材料制备而成，具有导热系数低^[39]、抗剪性能好^[40-41]的特点。它不仅能解决 CWP 整体性差的问题，还能避免普通连接件对墙板保温性能造成的破坏^[42]。因此，正确使用连接件对墙板的整体性能至关重要。具体来说：1) 连接件的布置间距需合理。《湖南省多层装配式后浇接缝混凝土夹心墙板建筑技术规程》(DBJ43/T 350—2019)规定，棒状连接件宜采用矩形或梅花形布置，间距不应大于 400 mm，距板边宜为 100 ~ 200 mm。2) 连接件数量需满足要求。对于全复合墙板，连接件的数量应不少于 10 个^[38]。3) 连接件内嵌墙板的角度与尺寸需详尽考虑。角度方面，各学者的研究有所相同，有的认为角度应设为 60° 或 75°^[43]，有的则认为 30° 最佳^[44]。总体趋势表明，插入角越小，CWP 的刚度与强度越大，板的复合性能越好，此外，角度间的组合衍生了米字型、X 型、三角型和八字型等布置方式，这些布置方式在墙

板的不同方面发挥着作用。例如,在三角型和八字型的比较中发现:八字型在墙板承载力和刚度上整体优于三角型,但在组合效应上三角型则优于八字型布置^[45]。尺寸方面,连接件的尺寸包括自身直径和锚固长度。LIU 等^[43]对比了直径为 8、10、12 mm 的连接件在墙板中的抗剪承载力贡献,结果与 TOULINSON 等^[46]的发现一致,即墙板的强度和刚度随直径的增大而增大。连接件的锚固长度(指连接件在墙板单侧混凝土板叶中的锚固深度)不应小于 30 mm。

综上,棒状连接件的正确使用需依据规范与经验确定其间距、数量、角度与尺寸,以使 CWP 的结构性能达到最佳水平。

2 复合墙板的设计

CWP 是一种能够发挥多种材料组合效应的新型建材,可实现质量轻、强度高、保温隔热性好等要求,因此在建筑领域深受关注。本文结合近年来的相关文献,从复合墙板的尺寸设计、结构与材料选择 3 个方面进行总结,旨在为读者在 CWP 的设计提供参考。

2.1 尺寸设计

根据需要设定好墙板的尺寸(高度、宽度和厚度),往往是墙板设计与研究的前提条件。依据规范,墙板的尺寸有着明确的要求,如《建筑隔墙用轻质条板通用技术要求》(JG/T 169—2016)在研究隔墙用轻质板条的抗冲击与抗弯性能时,规定试验条板长度不应小于 2.4 m,并在第 4.3 条中明确了规格尺寸范围,具体操作时需仔细阅读相

关条款。此外,规范通常提供的是墙板的通用标准,而要设计出合适的墙板尺寸,还需要结合试验的经验数据作为支撑,具体如表 2 所示。

其他的具体尺寸还包括夹芯墙板内外叶的厚度。内叶板的厚度通常以保温层的形式呈现,随着厚度的增加,墙板的抗弯刚度(因为高厚度的内叶芯材提供了更高的转动惯量^[53])、承载能力和组合性能改善,但同时墙板延性会下降^[54]。外叶板包裹内叶主要起保护内叶的作用,其厚度的增加可提高墙板的极限轴向强度和初始刚度,但对墙板的变形能力影响较小^[55]。此外,更好的设计选择不应仅局限于增加墙板内外叶的厚度,还应重视提升墙板内外叶材料的强度^[56]。

2.2 结构设计

墙板的结构设计主要体现在墙板的骨架上。现有的 CWP 研究多以发挥材料与结构的组合效应为重点,其中常见的有夹层和带肋结构,此外,芯柱式新型结构的设计也值得关注。

2.2.1 夹芯结构

夹芯结构由低密度、坚硬材料的芯材与两个薄而耐用的面板黏结而成。这种设计的理念是外层作为整个结构的主要承重部分,而核心除了具备隔音与隔热功能外,还通过增加其厚度为结构提供额外刚度^[57]。最初的这种设计多用于内部隔墙,原因在于外层和核心承重有限,并且受压后可能导致与核心分离,从而使得墙板整体无法承受较大重量。解决这一问题的关键在于芯材与界面的黏结性能。各式芯材的研究涵盖了泡沫芯^[58-59]、蜂窝芯^[60-61],并明确了其在不同荷载条件下的优缺点。在解决

表 2 设计墙板尺寸的经验数据

名称	含义	研究现状
长细比	墙板长度与宽度的比值,通常用于判断墙板的稳定性	张云雪 ^[47] 和徐玉峰 ^[48] 分别对不同墙板长细比范围的特征进行了研究,两者均得出一致结论:墙板长细比与承载能力成反比,与抗震性能呈正比变化规律。此外,他们还指出,较为合理的长细比设计范围为 0.8~1.0
高厚比	墙板高度与厚度的比值,其对墙板性能的影响主要体现在受压性能方面 ^[49]	在对条形 CWP 的研究中,AMRAN 等 ^[50] 探讨了高厚比(13.33~28.57)对墙板结构性能的影响,发现当高厚比从 13.33 增加到 28.57 时,墙板的极限承载力下降了 111%;而在最新的全尺寸 CWP 研究中,YAN 等 ^[51] 同样发现了高厚比与试件抗压承载能力之间的关系:当高厚比从 51.5 降低到 38.6 时,墙板的极限承载力可提高 124%,同时横向位移减少 54%
宽厚比	墙板宽度与厚度的比值	KIM 等 ^[52] 在确定钢板 CWP 宽厚比时,建议其值应小于等于 $0.907 \sqrt{E_s/F_y}$ (E_s 为钢的弹性模量,MPa; F_y 为面板规定的最小屈服强度,MPa)

注:表格中的经验数据均为墙板达到规范设计强度的基础上得出。

横流空气和湿度保持方面,二维与三维周期核心表现出更好的性能,并提供了出色的抗冲击和抗噪声响应。与此同时,网格桁架、三维编织蜂窝、三维辅助结构和等高线芯等新型结构的出现,进一步拓展了设计思路。

界面黏结是夹层结构设计中的关键环节,其黏结效果直接影响墙板的整体性及力学性能的发挥。界面黏结的方式主要包括胶黏剂与机械连接两种。其中,胶黏剂的黏接强度较低,因此较少被使用;而机械连接因能提供较高的黏结强度而被普遍采用,但其也存在应力集中、连接区域小等缺点。近期,随着冶金黏合和石墨烯纳米片增强胶黏剂的研究进展^[62-63],胶黏剂在建立更大连接区域、减轻应力集中和成本低等方面的优势逐渐显现。未来,在高性能夹层板的开发中,优化界面黏结强度和选择合适的胶黏剂仍将是重点研究方向。

2.2.2 带肋结构

带肋结构相比夹层结构,其改进之处在于优化了外层与核心的连接,通过钢筋桁架连接外层钢筋/丝网,从而保证了墙板结构的整体性。具体研究方面,李琮琦等^[64]比较了带肋与不带肋墙板的受弯性能,发现:带肋墙板能够有效改善内外叶协同工作,进而提高墙板整体刚度、开裂荷载及承载力;此外,暗肋水平和竖向同时设置的墙板受力效果最佳。在优化截面混凝土配置以降低复合墙板自重方面,梁远森等^[65]将传统 CWP 平板层改为带肋层,发现虽然带肋墙板的抗弯能力相比平板层有所降低,但总体降幅小于自重降幅。抗震性能上,高舒羽等^[66]结合带肋设计的承重

CWP 发现其具有良好的延性和耗能能力。在墙板热工性能方面,带肋墙板的传热系数相比传统的复合墙板更低,且肋间距为 200 mm 时传热系数降低最多^[67]。总体而言,带肋结构的形式可以有效补充 CWP 的承重问题。

2.2.3 芯柱式结构

芯柱式结构是一种新的受力形式(图 3),其通过在 CWP 的结构层中采用芯柱式钢筋来承受力^[68]。该结构具有剪力墙的特点,芯柱不仅可以承担结构带来的重量,而且超越了单纯的结构连接功能。同时,它还具备框架结构的特点,主要体现在墙板芯柱的设置上。这种 CWP 的结构设计非常新颖,弥补了 CWP 目前在承重方面的不足,同时也提供了新的设计思路,即建筑结构的缩小化与建筑构件的结合。

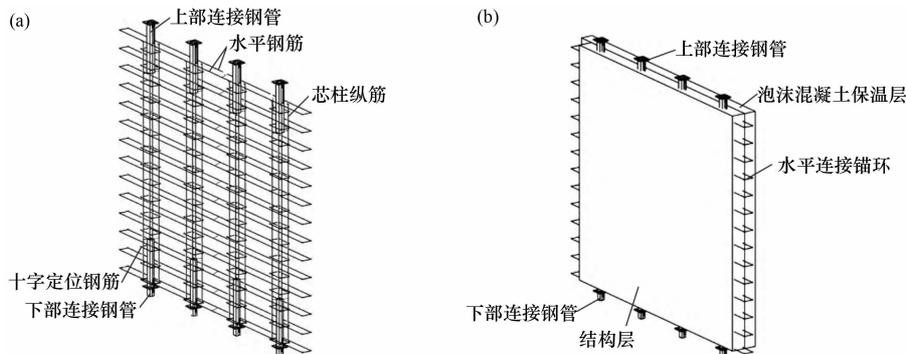
2.3 材料选择

2.3.1 面板

CWP 面板的材料选择需要满足轻质高强的特点,以匹配结构的受力需求^[69]。此外,墙板的外侧还须具备一定的耐腐蚀、保温、隔声以及抗火等性能。表 3 将常见的面板材料归纳为 4 类,并通过对其优缺点的整理,给出材料选择建议,仅供设计参考。

2.3.2 核心

CWP 的核心在于,相比于面板材料对强度的高要求,芯材的选择更加注重材料的保温性能,从而实现建筑节能的功效。在墙板设计时,芯材的选择通常倾向于强度较高的材料以发挥组合效应。然而,强度过高的材料往往因自密实性较差而限制了导热性能。因此,在对比面板材料选择



(a) 复合墙板结构层钢筋骨架示意; (b) 复合墙板整体示意

图 3 芯柱式结构

表 3 面板材料的选择

材料类别	优点	缺点	建议
金属	刚度高、损伤容忍度好、成本低、表面光洁度好	密度高、保温差	更适用于具有一定承重需求的墙板
泡沫混凝土	成本低、防火、保温、隔热、隔声、抗震	收缩大、强度低、易吸水	更适用于内墙,尤其是对保温和隔声有一定要求的场景
纤维增强聚合物	与普通混凝土相比,这种材料在抗裂、抗弯、抗震和耐久性等方面有着显著提升,同时具备绿色环保特性,并在轻量化结构领域展现出巨大潜力	施工过程中可能出现纤维分布不均,从而导致浆体结团的现象	更适用于对承重、抗弯和抗震有一定要求的场景
硅酸钙板	防火防水性能好、强度高、隔热隔音、耐久性能好	成本高、施工工艺要求高、易碎性	更适用于对防火性能有较高要求的场景

时,芯材的选择往往会适当降低对强度的要求。

常见芯材包括聚苯乙烯泡沫(expanded polystyrene, EPS)、绝热用挤塑聚苯乙烯泡沫塑料(extruded polystyrene, XPS)、聚氨酯甲酸酯(polyurethane, PU)、泡沫混凝土、蜂窝芯与岩棉,具体选择可参考表 4^[70-72]。芯材选择时应首先满足基本性能要求,再考虑经济性进行调整。

表 4 核心材料的选择

性能	比较结果
强度	EPS > XPS > PU、蜂窝芯 > 泡沫混凝土
保温性能	岩棉 > EPS > PU > XPS
复合性能	EPS > XPS
耐火性	岩棉 > 泡沫混凝土 > 蜂窝芯
吸声性	蜂窝芯 > 泡沫混凝土
抗拉强度	XPS > EPS
抗冲击性	蜂窝芯 > 泡沫混凝土
极限承载力	EPS > XPS
经济性	泡沫混凝土 > 蜂窝芯、XPS > EPS

3 结 论

(1) 在装配式建筑中, CWP 应用纤维材料的不同呈现形式对其性能提升具有重要作用。单丝形式纤维主要解决 CWP 基体轻质与高强之间的矛盾,通过适量掺入不同类型的单丝纤维,可显著提高 CWP 的抗压、抗弯和抗震性能。织物形式的纤维材料(如纤维布与纤维格栅)广泛应用于墙体加固领域,能够有效解决饰面脱落、开裂等问题。其粘贴层数、方式和位置对加固效果有直接影响,针对墙板开孔或开洞的情况也有相应的粘贴策略。棒状形式的纤维筋和纤维连接件分别用于解决

CWP 强度不足和整体性差的问题,在使用棒状连接件时,需依据规范和经验确定其间距、数量、角度与尺寸,从而实现 CWP 的最佳结构性能。

(2) 作为备受关注的新型建材, CWP 的设计涉及尺寸、结构与材料选择 3 个关键方面。1) 在确定墙板尺寸时,除了严格遵循相关规范外,还需重点关注长细比、高厚比和宽厚比等参数对墙板性能的影响。长细比与墙板稳定性密切相关,研究显示其合理范围为 0.8 ~ 1.0;高厚比主要影响墙板的受压性能,若高厚比增大,墙板的极限承载力会相应下降;而宽厚比通常建议控制范围为小于等于 0.907。2) 在结构设计方面,夹芯结构以外层承重为主,芯材提供隔音隔热等功能,其中芯材与界面的黏结问题为关键所在;带肋结构进一步优化了外层与核心的连接,提升了墙板的整体性能;芯柱式结构作为一种创新设计,有效弥补了 CWP 承重力不足的缺陷。3) 在材料选择上,面板材料需满足轻质高强的要求,同时具备耐腐蚀、保温、隔声、防火等多种性能。常见的面板材料各有优缺点,适用于不同的应用场景。芯材的选择则更侧重于保温性能,尽管常见的芯材在强度、保温等性能方面存在差异,但在选择芯材时应首先确保其满足基本性能要求,再综合考虑经济性进行合理抉择。

参考文献:

- [1] 吴继因,许志鹏,王铭涛,等. 纤维混凝土增韧效应研究进展[J]. 材料导报,2023,37(增刊1):220-223.
- [2] AREVALO S, TOMLINSON D. Experimental thermal bowing response of precast concrete insulated wall panels

- with stiff shear connectors and simple supports [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 30:101319.
- [3] POZO - LORA F, MAGUIRE M. Thermal bowing of concrete sandwich panels with flexible shear connectors [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 29:101124.
- [4] EGBON B, TOMLINSON D. Experimental investigation of longitudinal shear transfer in insulated concrete wall panels with notched insulation [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 43:103173.
- [5] 许金校,肖建庄,罗素蓉,等. 纤维再生混凝土的研究进展与展望[J]. *工业建筑*, 2022, 52(2):10 - 17;31.
- [6] 黄云超,高丹盈,朱海堂,等. 钢筋混凝土梁受拉区钢纤维影响系数的概率分布与取值建议[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2024, 32(3):860 - 874.
- [7] 刘茜,张津滔,高子祁,等. 短切玄武岩纤维混凝土简支梁正截面受弯性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(12):189 - 198.
- [8] 范小春,张澳,罗聪,等. BFRP 筋回收轮胎钢纤维混凝土短柱偏压性能试验[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(2):112 - 119.
- [9] 吴华英,梁炯丰,刘大为,等. 圆钢管钢纤维再生混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. *混凝土*, 2022(3):53 - 56.
- [10] 王硕,李妍. 绿色纤维混凝土带翼缘开洞剪力墙抗震性能研究分析[J]. *建筑结构*, 2022, 52(增刊1):842 - 847.
- [11] 张广泰,鲁海波,李雪藩,等. 钢 - 聚丙烯混杂纤维混凝土剪力墙抗剪承载力计算[J]. *工程抗震与加固改造*, 2022, 44(2):33 - 40.
- [12] 余其俊,林秋旺,李方贤,等. 硅酸钙板 - 纤维增强泡沫混凝土复合墙板的受压性能[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(9):88 - 95.
- [13] CASTILLO - LARA J F, FLORES - JOHNSON E A, VALADEZ - GONZALEZ A, et al. Mechanical behaviour of composite sandwich panels with foamed concrete core reinforced with natural fibre in four-point bending [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 169:108457.
- [14] CASTILLO - LARA J F, FLORES - JOHNSON E A, VALADEZ - GONZALEZ A, et al. Mechanical properties of natural fiber reinforced foamed concrete [J]. *Materials*, 2020, 13(14):3060.
- [15] ARISOY B. Wall panel application of fibre-reinforced lightweight concrete [J]. *Australian Journal of Civil Engineering*, 2010, 6(1):13 - 20.
- [16] MA S C, HOU D F, BAO P, et al. Influence of alkali-resistant glass fiber on seismic performance of precast ceramsite concrete sandwich wall panels [J]. *Structures*, 2022, 38:94 - 107.
- [17] LI Y, LI D Y, ZHAO R H, et al. Study on seismic performance of green fiber-reinforced concrete shear wall [J]. *Structures*, 2023, 57:105116.
- [18] 李必瑜,王雪松. 房屋建筑学(第 5 版)[M]. 武汉理工大学出版社, 2014.
- [19] 喻忠操. 基于落锤冲击试验机的砌体填充墙抗爆加固试验研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.
- [20] 肖从真,李建辉,马天怡,等. 既有建筑结构加固改造与性能提升现状与发展[J]. *工业建筑*, 2024, 54(1):20 - 30.
- [21] CORRADI M, BORRI A, CASTORI G, et al. Shear strengthening of wall panels through jacketing with cement mortar reinforced by GFRP grids [J]. *Composites Part B:Engineering*, 2014, 64:33 - 42.
- [22] 尹世平,李雨珊,徐世焱,等. 纤维编织网增强 ECC 夹心保温复合墙板抗弯性能[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(5):123 - 135.
- [23] SOPAL G J. Use of CFRP grid as shear transfer mechanism for precast concrete sandwich wall panels [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2013.
- [24] HODICKY K, SOPAL G, RIZKALLA S, et al. Experimental and numerical investigation of the FRP shear mechanism for concrete sandwich panels [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(5):04014083.
- [25] CHOI W, JANG S J, YUN H D. Design properties of insulated precast concrete sandwich panels with composite shear connectors [J]. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 157:36 - 42.
- [26] 刘骥夫. GFRP 加固砌体墙力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- [27] AMAN S S, MOHAMMED B S, WAHAB M A, et al. Performance of reinforced concrete slab with opening strengthened using CFRP [J]. *Fibers*, 2020, 8(4):25.
- [28] KHAN H A, NANDA R P. Out-of-plane bending of masonry walette strengthened with geosynthetic [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 231:117198.
- [29] MOHAMMED B S, EAN L W, MALEK M A. One way RC wall panels with openings strengthened with CFRP [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 40:575 - 583.
- [30] ABAS GOLHAM M, ALI AL - AHMED A H. Behavior of GFRP reinforced concrete slabs with openings strengthened by CFRP strips[J]. *Results in Engineering*,

- 2023,18:101033.
- [31] 郝际平,冯啸天,于金光. FRP-钢复合板剪力墙力学性能试验研究[J]. 土木工程学报,2023,56(9):1-14.
- [32] ELZAROUG O, FORTH J, YE J, et al. Flexural performance of concrete slabs reinforced with GFRP rebars [J]. *Civil and Environmental Research*,2013,5:6-11.
- [33] 蔡植滨,李皓,张午阳,等. 基坑钢筋-玻璃纤维筋混凝土桩支护性能及应用研究[J]. 广州建筑,2023,51(6):9-12.
- [34] JU M,PARK K,PARK C. Punching shear behavior of two-way concrete slabs reinforced with glass-fiber-reinforced polymer(GFRP) bars [J]. *Polymers*,2018,10(8):893.
- [35] ANIL Ö,KAYA N,ARSLAN O. Strengthening of one way RC slab with opening using CFRP strips [J]. *Construction and Building Materials*,2013,48:883-893.
- [36] ATTIA K, ALNAHHAL W, ELREFAI A, et al. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with BFRP and GFRP bars. *Composite Structures*,2019,211:1-12.
- [37] 闫清峰,张纪刚. 纤维增强复合材料在土木工程中的应用与发展[J]. 科学技术与工程,2021,21(36):15314-15322.
- [38] SHIN D H, KIM H J. Composite effects of shear connectors used for lightweight-foamed-concrete sandwich wall panels [J]. *Journal of Building Engineering*,2020,29:101108.
- [39] SORENSEN T, TAWADROUS R, MAGUIRE M. Thermally efficient corbel connections for insulated sandwich wall panels [J]. *Journal of Building Engineering*,2022,45:103424.
- [40] HUANG J Q, DAI J G. Direct shear tests of glass fiber reinforced polymer connectors for use in precast concrete sandwich panels [J]. *Composite structures*,2019,207:136-147.
- [41] HE Z Z,PAN P,XIAO G Q, et al. Test and analysis on axial performances of GFRP restraint connectors for sandwich insulation wall panels [J]. *Journal of Building Engineering*,2022,45:103457.
- [42] KUMAR S, CHEN B Q, XU Y Y, et al. Axial-flexural behavior of FRP grid-reinforced geopolymer concrete sandwich wall panels enabled with FRP connectors [J]. *Journal of Building Engineering*,2022,47:103907.
- [43] LIU X,WANG X,YANG T, et al. The shear behavior of insulated precast concrete sandwich panels reinforced with BFRP [J]. *Buildings*,2022,12(9):1326.
- [44] XIE J H,CHEN F M,ZHAO J B, et al. Flexural behaviour of full-scale precast recycled concrete sandwich panels with BFRP connectors [J]. *Journal of Building Engineering*,2022,56:104816.
- [45] 江焕芝. 基于钢-纤维复合连接件的预制混凝土夹心保温墙板性能研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [46] TOMLINSON D G, TEIXEIRA N, FAM A. New shear connector design for insulated concrete sandwich panels using basalt fiber-reinforced polymer bars [J]. *Journal of Composites for Construction*,2016,20(4):04016003.
- [47] 张云雪. 不同高宽比泡沫混凝土墙板水平受力性能研究[D]. 长春:吉林建筑大学,2018.
- [48] 徐玉峰. 混凝土-聚苯板复合墙板抗震性能试验研究[D]. 济南:山东建筑大学,2022.
- [49] MOHAMAD N, OMAR W, ABDULLAH R. Precast lightweight foamed concrete sandwich panel (PLFP) tested under axial load: Preliminary results [J]. *Advanced Materials Research*,2011,250/251/252/253:1153-1162.
- [50] MUGAHED AMRAN Y H, ALYOUSEF R, ALABDUL JABBAR H, et al. Influence of slenderness ratio on the structural performance of lightweight foam concrete composite panel [J]. *Case Studies in Construction Materials*,2019,10:e00226.
- [51] YAN Z H, SHEN C Y, FANG H, et al. Compressive performance of full-scale GFRP composite sandwich wall panels with wood core [J]. *Journal of Building Engineering*,2024,86:108979.
- [52] KIM S H, YOON S J, CHOI W. Determination of slenderness ratio of faceplates in steel-plate composite wall panels [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*,2019,23(2):691-698.
- [53] SHABAN M, ALIBEIGLOO A. Three-dimensional elasticity solution for sandwich panels with corrugated cores by using energy method [J]. *Thin-Walled Structures*,2017,119:404-411.
- [54] 尹世平,李雨珊,徐世焱,等. 纤维编织网增强 ECC夹心保温复合墙板抗弯性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(5):123-135.
- [55] WANG L,WU Z M,LIU W Q, et al. Structural behavior of load-bearing sandwich wall panels with GFRP skin and a foam-web core [J]. *Science and Engineering of Composite Materials*,2018,25(1):173-188.
- [56] TEKALUR S A, BOGDANOVICH A E, SHUKLA

- A. Shock loading response of sandwich panels with 3-D woven E-glass composite skins and stitched foam core [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(6): 736 – 753.
- [57] SINGH P, SHEIKH J, BEHERA B K. Metal-faced sandwich composite panels: A review [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 195: 111376.
- [58] CHEN L M, YE M M, LIU Z, et al. Experimental investigation on low-pressure pulse dust cleaning performance of plate-frame microporous membrane filter media [J]. *Powder Technology*, 2020, 375: 352 – 359.
- [59] GÜRGEN S, SOFUOĞLU M A. Vibration attenuation of sandwich structures filled with shear thickening fluids [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 186: 107831.
- [60] QIN Q H, CHEN S J, LI K K, et al. Structural impact damage of metal honeycomb sandwich plates [J]. *Composite Structures*, 2020, 252: 112719.
- [61] ZHANG J X, ZHU Y Q, YUAN H, et al. Failure behavior of sandwich beams with glass fiber-reinforced epoxy/aluminum laminates face-sheets and aluminum honeycomb core under three-point bending [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 177: 109476.
- [62] CHEN C, LI Y X, GU Y Z, et al. Effect of MWCNTs added by electrostatic flocking method on adhesion of carbon fiber prepreg/Nomex honeycomb sandwich composites [J]. *Materials & Design*, 2017, 127: 15 – 21.
- [63] MOTTAGHIAN F, TAHERI F. On the flexural response of nanoparticle-reinforced adhesively bonded joints mating 3D-Fiber Metal Laminates – A coupled numerical and experimental investigation [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2023, 120: 103278.
- [64] 李琮琦, 杨滢, 刘虎山, 等. 暗肋夹芯式预制轻骨料混凝土外墙板受弯性能试验研究 [J]. *建筑结构*, 2022, 52(6): 18 – 25; 55.
- [65] 梁远森, 王宁, 季可凡, 等. 带肋预应力混凝土复合墙板的抗弯性能 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(5): 101 – 111.
- [66] 高舒羽, 郭小农, 刘青, 等. 预制复合墙板承载性能试验研究 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(1): 48 – 57.
- [67] 钱一乔. 预制带肋复合墙板的热工性能分析 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [68] 麻建锁, 李雪娜, 蔡焕琴. 预制芯柱式普通 – 泡沫混凝土复合外墙板技术研究 [J]. *混凝土*, 2019(8): 125 – 127.
- [69] 李闻达. 装配式钢结构建筑新型复合墙板研发及构造技术研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [70] 赵洋. 适用于超低能耗建筑的夹心保温墙体及其连接件力学性能研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- [71] SINGH P, SHEIKH J, BEHERA B K. Metal-faced sandwich composite panels: A review [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 195: 111376.
- [72] 韩鹏涛. 连接件对预制混凝土夹芯保温外挂墙板结构性能影响研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.