

纤维水泥板外墙覆层承载力在火灾影响下有所降低

帕维尔·扎维, 卢卡斯·沙博维茨

所属单位: 波兰土木工程学院

摘要: 本文分析了火灾期间纤维水泥板的负载能力下降的问题。通过使用大型外墙模型, 将纤维水泥板置于火灾的影响之下。这种模型是关于外墙包层的行为和火灾蔓延方式的可靠知识来源。一种用于外墙的技术解决方案——通风外墙——正在得到普及, 并被越来越多地使用。然而, 对于用于外墙包层的一系列不同材料在火灾中的破坏问题认识不足。在这项研究中, 作者使用纤维水泥板作为外墙覆层。纤维水泥板是纤维增强的复合材料, 主要用于外墙覆层, 也可用作屋顶覆层、干墙、干墙天花板和地板。本文利用一个大规模的外墙模型分析了火灾温度对外墙包层的影响。从外墙覆层材料上取样, 这些样品被安装在模型上燃烧室上方的特定位置。随后, 进行了三点弯曲试验, 评估了温度以及温度和时间函数的积分对样品的影响。选择三点弯曲试验是因为它是评估纤维水泥板的通用方法, 在标准EN12467中被引用。它还可以方便地参考其他文献中的结果。

关键词: 通风外墙; 消防安全; 纤维水泥板; 抗弯强度; 覆层

Reduction of Load Capacity of Fiber Cement Board Facade Cladding under the Influence of Fire

Pawel Zawi, Lukasz Schabowicz

Affiliation: Faculty of Civil Engineering, Poland

Abstract: The paper analyzes the issue of the reduction of load capacity in fiber cement board during a fire. Fiber cement boards were put under the influence of fire by using a large-scale facade model. Such a model is a reliable source of knowledge about the behavior of facade cladding and the way fire spreads. One technical solution for external walls—a ventilated facade—is gaining popularity and is used more and more often. However, the problem of the destruction during a fire of a range of different materials used in external facade cladding is insufficiently recognized. For this study, the authors used fiber cement boards as the facade cladding. Fiber cement boards are fiber-reinforced composite materials, mainly used for facade cladding, but also used as roof cladding, drywall, drywall ceiling and floorboards. This paper analyzes the effect of fire temperatures on facade cladding using a large-scale facade model. Samples were taken from external facade cladding materials that were mounted on the model at specific locations above the combustion chamber. Subsequently, three-point bending flexural tests were performed and the effects of temperature and the integrals of temperature and time functions on the samples were evaluated. The three-point bending flexural test was chosen because it is a universal method for assessing fiber cement boards, cited in Standard EN 12467. It also allows easy reference to results in other literature.

Keywords: ventilated facades; fire safety; fiber cement board; flexural strength; cladding

引言:

通风外墙是一种现代技术解决方案, 用于多层墙体的外部部分。它包括一个机械或粘附在副框架上的外墙覆层。子框架以机械方式连接到建筑物的外墙结构上。外墙包层可以由各种材料制成, 例如, 纤维水泥板、混凝土板、钢元素、陶瓷和其他复合元素。外墙包层通常

根据外墙的个别技术设计和产品制造商提出的要求进行安装。它们是非承重元素, 只承担自身的重量和环境影响, 如雪、风和温度。外墙包层不能保证建筑的气密性, 只能在一定程度上保证对固定外墙的支撑墙体外表面的保护。通风外墙是一套完整的独立组件, 构成了一个系统解决方案。对完整的通风外墙系统提出要求的标准是

ETAG 034-1, 整个系统的各个组成部分必须另外满足国家要求。

通风外墙最重要的元素是外墙覆盖层和保温层(矿棉或石棉)之间的空气间隙, 如果没有使用保温层, 则是支撑墙。根据ETAG 034-1, 空气间隙, 也称为通风空气空间, 应该至少有20毫米; 文献也提供了通风空气空间应该在20毫米到50毫米之间的信息。在不影响整个系统的性能功能的前提下, 可以根据覆层和下部结构的不同, 将其局部减少到5-10毫米。最重要的参数, 与通风空气空间的尺寸无关, 是气流通过空气间隙的适当可能性。这不仅由通风空间的尺寸来保证, 也由适当数量的通风缝隙来保证, 允许空气进入这个空间。通风缝隙为通风空气空间提供空气, 至少应该是 $50 \text{ cm}^2/1 \text{ m}$ 的外墙, 假设它们至少在基点和屋顶的边缘处。通风外墙允许用不同的材料、结构、纹理或颜色来制作外墙包层。由于良好的美学和耐用性, 通风外墙越来越多地被用作新建建筑的多层外墙的技术解决方案, 但它在正在装修的建筑中也表现良好。外墙覆盖物可以由非常大的元件组成, 例如, 纤维水泥板的标准尺寸是 $1.25 \times 3.10 \text{ mm}^2$, HPL(高压层压板)板的标准尺寸是 $1.85 \times 4.10 \text{ mm}^2$ 。

本文分析了一个通风的外墙, 其外墙覆层由纤维水泥板制成, 被归类为纤维增强复合材料。这些复合材料的特点是有两个阶段。第一阶段是水泥基体, 以波特兰水泥为基础。这些复合材料的第二相是分散相, 其特点是纤维以不连续和随机取向的方式分布。在纤维增强复合材料的情况下, 它们提供了许多在正常条件下使用纤维的好处。减轻剥落风险的标准技术是添加合成的、低熔点的纤维, 这些纤维在加热到高温时熔化和汽化, 留下通道, 为蒸汽提供通道, 从而减少孔隙压力的积累。Khoury解释了纤维促进孔隙压力衰减的其他不太重要的机制。常用的PP合成纤维的熔点为 $160-180^\circ\text{C}$ 。现在有一种趋势是在RPC中使用聚乙烯醇(PVA)纤维, 在有腐蚀问题的应用中部分或全部取代钢纤维。PVA纤维与水泥基体的良好粘合特性, 加上其比PP更高的弹性模量, 导致了更好的结构性能; 另外, 使用大量PP时遇到的可操作性问题在PVA纤维上也不会遇到。PVA纤维的熔点也是 220°C 。

此外, 在混凝土中加入聚丙烯(PP)纤维似乎是非常有效的。PP在 170°C 熔化, 而剥落发生在 190°C 和 250°C 之间。当熔化并被水泥基体部分吸收时, 纤维会留下一条气体通道。因此, 它们有助于建立一个比基体更有渗透性的网络, 这使得气体向外迁移, 导致孔隙压

力的降低。纤维水泥板在火灾温度和火灾情况下在外墙上的行为方面还没有得到广泛的研究。Szymkow的研究表明, 纤维水泥板中的纤维在暴露约3小时后在 230°C 的温度下被破坏。在高达 300°C 的温度下, 混凝土和纤维混凝土的抗压强度下降了约10%。相反, 对于纤维增强的水泥复合材料, 弯曲强度随着温度的增加而增加, 最高可达 300°C 。在纤维混凝土和纤维水泥的抗压强度的情况下, 这种温度上升并没有降低抗压强度; 相反, 它通过从孔隙中蒸发水分来增加强度(这一点被试验所证实, 其中高温作用于纤维混凝土样品约100分钟)。如上述试验所示, 在大约 300°C 范围内的温度只对纤维有危险, 因为它们熔点被超过了。高于 400°C 的温度, 如Szymkow的研究中提出的, 只在短时间内(通常在2.5-7.5分钟的范围内, 取决于样品)加强水泥基体。在这段时间内, 水从孔隙中蒸发, 这增加了弯曲能力, 但在这段时间之后, 纤维开始融化, 然后强度急剧下降。不幸的是, 影响外墙覆盖物的火灾温度在局部可能达到甚至超过 800°C 的数值。不幸的是, 没有关于纤维水泥板的实验研究。从上述其他纤维材料的类比来看, 在参考文献中得到了有趣的结论。其中对混凝土和纤维增强混凝土进行了测试。在 800°C 的温度下, C30/37级的混凝土和纤维增强的混凝土的抗压强度降低了90%以上。在 500°C 和 600°C , 没有添加纤维的样品在其退火过程中被破坏, 而添加了聚丙烯纤维的样品保留了剩余的抗弯强度。

通风外墙与ETICS(外部热绝缘复合系统)外墙相比, 在火灾期间外墙构件坠落的问题上, 显示出更差的参数。负责在火灾发生时疏散建筑物内人员的应急单位, 尤其面临着风险。这个问题在科学界是众所周知的, 欧洲委员会的工作也是基于解决这个问题。有几种方法可以测试纤维水泥板对高温的反应。其中一个是由Szymkow在参考文献中提出的。通过在专门为该测试准备的炉子中对样品进行退火。一个类似的影响纤维水泥板样品的方法在参考文献中被采用。就这种测试形式而言, 世界上有许多测试这种模型的标准。在大多数情况下, 它们假设火灾从一个开口向外墙蔓延, 并模拟房间的窗子开口。一个由温度作用标准曲线定义的炉灶(火源)位于一个凹槽中。火焰从开口处窜出, 影响到外墙和其他墙体元素。这些标准在细节上有所不同, 即, 炉灶的类型(木制床或气体), 开口尺寸, 测试时间, 以及大型外墙模型及其尺寸。参考文献中总结了测试真人大小的外墙模型消防安全的不同标准的比较。

通风幕墙的材料和方法

通过对文献的分析,人们注意到了纤维水泥板在通过火灾暴露于高温时的反应和破坏方面的不足。作者决定验证火灾作用下的高温是如何影响外墙纤维水泥板的抗弯强度下降的。为了进行这项研究,作者准备了一个外墙的模型。为此目的,他们使用了一个大型的外墙模型。要分析的外墙被连接到一个由蒸压蜂窝混凝土块、传统砖石和浇筑的钢筋混凝土门楣组成的测试平台上。

外墙是由8毫米厚的自然色纤维水泥板制成的,没有颜料。包层用机械连接的方式固定在镀锌钢底层结构上。底层结构是通过控制台机械地连接到平台上的。除了大规模外墙模型的全貌,可以看到沙子燃烧器和燃烧室,通过它们来实现火灾场景。左右两部分的外墙包层是以不同的方式固定的,这导致左侧部分突出于平面的表面。

高温对外墙的影响是通过火灾和燃烧室中逸出的火气来测试的——房间里起火和火灾通过窗口逃到外墙上情景被执行。后墙的燃烧室包含一个鼓风机,这使我们能够再现火灾的真实情况。火源是一个沙子燃烧器,它使用气体作为燃料——通过质量流量计进行适当的计量。沙子燃烧器使用纯度为95%的液体丙烷(PG NiG Polska)作为燃料,其释放率的比例符合外部曲线的火势发展,这是EN 13501-2中引用的外墙火灾的特征。国际火灾曲线显示了源头位置的温度随时间的变化过程。从房间侧面的层状空气流入是由蜂窝提供的。大规模的外墙模型配备了一套热电偶(命名为TE1-TE9),以验证和识别外墙覆层的损坏。它们是按照火焰和热火气体的预期发展和影响来放置的。热电偶被放置在板状覆层的表面——在燃烧室上方800毫米、1600毫米和2500毫米的高度上有3排。这些地方是根据从燃烧室出来的火焰的预期形状来选择的。

测试和结果

用沙子燃烧器进行加热的测试场景相当于在位于外墙正后方的房间(建筑物内)发生真实火灾时的火灾强度,火焰从窗户逃出并影响外墙。测试是在环境温度为22.3℃,相对湿度为52%。测试开始时,设置了燃烧器并正确校准了所提供的气体。测试的开始——靠在斜面上的火焰的均匀分布是很明显的。这样的景象是测试开始时的特点,在这个阶段,模型没有暴露在外风中,外墙包层在初始阶段还没有退化。火灾的前6分钟,外墙包层出现了烟雾/焦痕,上部夹板出现了裂缝,这是最容易暴露在高温下的。安装在天花板上的外墙包层首先脱落,

时间范围为9分钟至14分钟。在这期间,外墙包层的破坏在继续,在离底部600毫米范围内,已经成为目标的外墙包层上显示了持续的破坏程度。此外,可以看到在火灾温度的作用下,外墙包层恶化的过程;在随后的几分钟内,外墙包层元件脱落了。在第17分钟的时候,侧翼的板子脱落了。

在试验结束时,随着越来越多的元件脱落,较高元件上的纤维水泥板的承重能力逐渐耗尽。热电偶在测试期间连续记录温度。这些测试的结果显示,TE1和TE5热电偶以及TE6和TE8热电偶的温度是相似的,工作在低温范围—低于100℃。这样的温度对纤维水泥板中的纤维没有破坏性的影响。整个材料在这些温度下也没有显示出主要的磨损迹象。在TE2、TE3和TE4热电偶的情况下,可以看到比例失调,即大规模外墙模型右侧的温度要高得多——这是由于覆层在表面之外的突出部分较小。虽然这种差异很小(20毫米),但它将所有的火焰引向TE4热电偶所在的右侧。同样值得注意的是,火焰源对位于非中心位置的热电偶,如TE2和TE4,比对位于中心但较高位置的热电偶,如TE7的影响要大得多。

讨论

从燃烧室上方约700毫米的高度采集的D4样品显示出比前一个样品更好的抗弯强度。破坏在试验机中发生得非常迅速。不幸的是,与上述样品一样,这些材料与未降解的材料不一样。对于所取的两个样品,它们的强度有很大的差别,分别为10.26兆帕和3.86兆帕。对于弹性模量,这些数值是相似的。这些样品是在距顶部斜面约700毫米的高度取的,这大致相当于TE3热电偶和上面显示的温度。高达600℃的温度会导致样品的完全破坏。这个区域的包层成分在大约17'15"后脱落。D3样品来自燃烧室上方约1200毫米的顶棚区域。样品也是从大规模外墙模型上脱落的元素中提取的。这些持续了大约34'直到它们脱落。D3的样品显示出比在D4和D5位置取的样品更强的强度稳定性。尽管弹性模量和MOR增加了,但与参考样品相比,它们仍然显示出降低的负载能力。受火的样品,即使是在上部斜面上1200毫米,也没有显示出足够的强度,其弹性模量显示出降低的数值。可以注意到一个趋势,温度和时间函数的积分,尽管对D3样品的影响明显更大,但并没有显示出较低的弹性模量,只有抗弯强度降低。因此可以假设,在这个函数上有如此大的影响,样品留在外墙上只是因为其内部的倾向性,例如,靠近机械紧固件(铆钉)。在约200毫米或约1200毫米的高度取样,显示出低的抗弯强度参数。

结论

大规模的外墙模型是关于火灾期间外墙包层行为和火灾蔓延方式的重要知识来源。对于不同材料的外墙覆层在火灾中的破坏问题没有得到充分的认识。作者使用纤维水泥板,即纤维增强的复合材料,作为外墙包层。在分析纤维水泥板的负载能力下降时,必须区分两个关键因素:元素从外墙包层上脱落的时间和退化的程度。在火灾引起的降解元件脱落的情况下,温度和暴露时间是至关重要的,其结果是较低的部分首先脱落,尽管纤维的熔点在外墙的较大面积上被超过了。除了温度之外,元件脱落的时间也受到覆层突出整个外墙表面的程度的影响。火灾有一个明显的趋势,那就是向覆层更靠近支撑墙体结构的方向蔓延。在最初的几分钟里,模型中的覆层被烧焦和破坏。在第17分钟时,第一块重要的碎片从外墙脱落。

掉下来的部件被拿去测试,显示出它们的抗弯强度不够,无法继续使用。同样值得注意的是,从较高部位脱落的外墙包层碎片的降解程度较低,尽管负责温度和时间功能的积分明显较大。较高的温度(在火灾范围内)比大约200℃或更低的温度有更大的破坏力,在一个更长的时间段内。在更长的时间段内,时间-温度函数的积分约为44%。在弯曲强度方面,较高的火灾温度的影响也比持续时间更显著。来自模型较低部位的样品具有较低的弹性模量和抗弯强度值。所有取自燃烧室水平以上约1300毫米高度的样品都不适合再使用。在这样的状态下,它们的进一步使用会对在这样的高度下活动的人造成很大的危险。所进行的测试表明,在火灾的影响下,固定在测试模型不同部位的纤维水泥板覆层的抗弯强度下降的分布。作者计划使用大型外墙模型进行进一步研究。潜在的可能研究包括分析纤维在水泥基体内降解所需的时间,以及进一步对负载能力的行为和耗损进行更全面的研究。

参考文献:

[1]Sanchayan, S.; Foster, S.J. High temperature behaviour

of hybrid steel - PVA fibre reinforced reactive powder concrete. *Mater. Struct.* 2016, 49, 769 - 782.

[2]Abdullah Shukry, N.; Ahmad Sekak, K.; Ahmad, M.; Bustami Effendi, T. Characteristics of Electrospun PVA-Aloe vera Nanofibres Produced via Electrospinning. In *Proceedings of the International Colloquium in Textile Engineering, Fashion, Apparel and Design 2014 (ICTEFAD 2014)*; Springer: Singapore, 2014; pp. 7 - 12.

[3]Kalifaa, P.; Chene, G.; Galle, C. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure. *Cem. Concr. Res.* 2001, 31, 1487 - 1499.

[4]Schroeter, J.; Felix, F. Melting cellulose. *Cellulose* 2005, 12, 159 - 165.

[5]Bednarek, Z.; Drzymała, T. Wpływ temperatur występowujących podczas pożaru na wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu. *Zesz. Nauk. SGSP* 2008, 36, 61 - 84.

[6]Drzymała, T.; Ogrodnik, P.; Zegardło, B. Wpływ oddziaływania wysokiej temperatury na zmianę wytrzymałości na zginanie kompozytów cementowych z dodatkiem włókien polipropulenowych. *Tech. Transp. Szyn.* 2016, 23, 82 - 86.

[7]EN 1363:1-2012. Fire Resistance Tests-Part 1: General Requirements; CEN: Brussels, Belgium, 2012.

[8]Al-Attar, A.; Abdulrahman, M.; Hussein, H.; Tayeh, B. Investigating the behaviour of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete beams after exposure to elevated temperatures. *J. Mater. Res. Technol.* 2019, 9, 1966 - 1977.

[9]Se, dłak, B.; Kinowski, J.; Sulik, P.; Kimbar, G. The risks associated with falling parts of glazed facades. *Open Eng.* 2018, 8, 147 - 155.

[10]Veliseicik, T.; Zurauskiene, R.; Valentukeviciene, M. Determining the Impact of High Temperature Fire Conditions on Fibre Cement Boards Using Thermogravimetric Analysis. *Symmetry* 2020, 12, 1717.