

使用天然纤维维持稳定的泡沫地质聚合物: 综述

费利西塔斯·维茨莱本, 迪特玛·梅廷, 史蒂芬·沃尔布鲁克, 凯瑟琳·史蒂芬

隶属机构: 德国土木工程系

摘要: 开发具有减少碳足迹的可持续、环保绝缘材料正引起越来越多的关注。传统绝缘材料的一种替代品是泡沫地质聚合物。与泡沫混凝土类似, 泡沫地质聚合物的力学性能也可以通过使用纤维加固来提高。本文概述了纤维增强泡沫地质聚合物混凝土领域的最新研究成果, 特别关注天然纤维增强。此外, 报告了天然纤维和泡沫地质聚合物的一些基本和背景信息。在大多数研究中, 泡沫是通过用过氧化氢或铝粉进行化学发泡或通过包含发泡剂的机械发泡来生产的。然而, 以前的评论还没有充分解决通过复合泡沫制造泡沫地质聚合物的问题。最后, 讨论了最近为减少地质聚合物混凝土中的纤维降解所做的努力, 以及天然纤维增强泡沫地质聚合物混凝土面临的挑战。

关键词: 泡沫地质聚合物; 保温材料; 天然纤维

Natural Fiber-Stabilized Geopolymer Foams: A Review

Felicitas Witzleben, Dietmar Maeting, Steffen Walbruck, Katharina Stephan

Affiliation: Department of Civil Engineering, Germany

Abstract: The development of sustainable, environmentally friendly insulation materials with a reduced carbon footprint is attracting increased interest. One alternative to conventional insulation materials are foamed geopolymers. Similar to foamed concrete, the mechanical properties of geopolymer foams can also be improved by using fibers for reinforcement. This paper presents an overview of the latest research findings in the field of fiber-reinforced geopolymer foam concrete with special focus on natural fibers reinforcement. Furthermore, some basic and background information of natural fibers and geopolymer foams are reported. In most of the research, foams are produced either through chemical foaming with hydrogen peroxide or aluminum powder, or through mechanical foaming which includes a foaming agent. However, previous reviews have not sufficiently addresses the fabrication of geopolymer foams by syntactic foams. Finally, recent efforts to reduce the fiber degradation in geopolymer concrete are discussed along with challenges for natural fiber reinforced-geopolymer foam concrete.

Keywords: Geopolymer foam; thermal insulation material; natural fiber

引言:

根据国际能源机构的数据, 建筑物占全球能源相关二氧化碳排放量的 28% (2018 年), 而供暖占最大份额。然而, 隔热降低了建筑物的加热和冷却需求, 因此减少了能源需求。一般来说, 保温材料按其原料可分为无机或有机材料和天然或合成材料。

最常见的绝缘材料, 如挤压或膨胀聚苯乙烯、矿棉或轻质混凝土, 都是基于石油或水泥等不可再生资源。尤其是水泥是最大的温室气体生产商之一, 在工业部门的二氧化碳排放量占 26%。普通波特兰水泥 (OPC) 是 2018 年全球使用最多的建筑材料, 由于其高耐用性和低

成本: 生产了约 41 亿公吨水泥。然而, OPC 具有高隐含能量和每吨水泥产生 0.6 公吨二氧化碳 (仅在 2018 年仅适用于德国) 的全球变暖潜势。因此, 对可持续隔热材料开发的兴趣日益浓厚。一种水泥基绝缘材料的替代品是泡沫地质聚合物。以前的研究报告称, 由于在地质聚合物粘合剂中使用工业废物或副产品, 与 OPC 相比, 二氧化碳排放量减少了高达 80%。这些 CO₂ 排放数据基于 ISO 14067 的生命周期评估 (LCA)。然而, 各种因素会影响 LCA 研究的结果。

根据 Teh 等人的说法, 诸如为分析设定系统边界、上游供应链流程的排放量或使用国家特定数据等方法问

题会导致不准确。此外, 为了改善最终地质聚合物的性能, 可以使用天然纤维或纳米颗粒等添加剂。纳米颗粒有时用于增强机械性能, 并与天然纤维纳米颗粒结合使用, 减少纤维的降解, 从而实现更好的复合材料耐久性。天然纤维本身具有几个积极的特性, 例如低成本、低密度和低导热性。因此, 本综述文章重点关注结合了天然纤维和纳米粒子的泡沫地质聚合物系统, 以改善最终地质聚合物的性能。

一、地质聚合物

根据 Davidovits 的说法, 地质聚合物的合成通常可以描述为硅铝酸盐与碱金属聚硅酸盐的反应, 导致形成 Si-O-Al 键。与高钙碱性渣的活化相比, 地质聚合物含有较少的钙并产生无定形或半结晶的三维大分子结构。Xu 和 van Deventer 认为, 二氧化硅和氧化铝的溶解需要碱金属盐或氢氧化物的存在, 它们也是缩合反应的催化剂。在高 pH 值下, 铝硅酸盐的溶解非常迅速, 并导致产生过饱和溶液。

地质聚合反应的第一阶段的特点是形成高反应性中间凝胶, 这是单个铝和硅酸盐物质共聚的结果。水相中的低聚物继续缩合并形成大的网络。结合的水在缩聚过程中被释放并保留在凝胶的孔内。反应一直持续到形成一个网络, 该网络由通过共享所有氧原子连接的 SiO₄ 和 AlO₄ 四面体组成。

二、原料

通常, 地质聚合物由硅铝酸盐前体和碱性活化剂组成。铝硅酸盐前体必须富含铝 (Al) 和硅 (Si)。因此, 用于地质聚合物合成的最常见的硅铝酸盐前体是粉煤灰 (FA)、磨碎的粒状高炉渣 (GGBFS) 和偏高岭土 (MK)。

飞灰 (FA) 是燃煤发电厂产生的工业废物或副产品。在燃烧过程中, 所有不可燃和矿物成分都熔化成大部分球形和玻璃状颗粒。之后, 大约 99% 的这些颗粒被静电过滤器从废气流中收集。这些颗粒的直径在 0.5 至 300 μm 范围内, 主要由二氧化硅 (SiO₂)、氧化铝 (Al₂O₃) 和氧化铁 (III) (Fe₂O₃) 组成。除了这些成分外, 一些次要成分如 Ca、Mg、Na 和 K 的氧化物也积累在颗粒中。粉煤灰可以根据 EN 197-1 分类, 因为它们的活动性氧化钙含量为硅质 V (>10 wt. % CaO) 和钙质 W (10 至 15 wt. % CaO) 粉煤灰或根据 ASTM C618 -19 分为 N 类 (未加工或煅烧的天然火山灰)、F (火山灰性质) 和 C (火山灰和水泥性质)。Hajimohammadi 等人 and Al Bakri Abdullah 等人使用的粉煤灰含有 13.6 wt. % 的高氧化钙量

和 21.6 % 重量用于地质聚合物的合成。由于硅酸钙水合物 (C-S-H) 的形成, 大量 CaO 导致更高的抗压强度。

高炉渣 (BFS) 与粉煤灰一样, 是一种工业副产品, 在高炉炼钢过程中产生。根据 ASTM C125-19, 高炉渣可归类为非金属产品, 主要由 CaO、SiO₂ 和 Al₂O₃ 组成。与粉煤灰相比, 高炉渣的钙含量更高。因此, C-S-H 相是碱活化高炉渣的主要产物之一。

另一种常见的钙含量极低的硅铝酸盐来源是偏高岭土, 这是一种火山灰材料, 通过粘土矿物高岭石在 650°C 至 750°C 的温度下脱羟基而获得。诺维斯等人研究了偏高岭土和粉煤灰的矿物学和化学成分, 确定了无定形 SiO₂ 和 Al₂O₃ 以及晶相石英、白云母和锐钛矿是偏高岭土的主要成分。与粉煤灰相比, 偏高岭土的 XRD 图案显示出更高的无定形含量, 这由 2 θ 角 20° 和 30° 之间的宽反射信号表明。

三、天然纤维

根据 Bhattacharyya 等人的说法, 天然纤维可以细分为植物、动物和矿物纤维。植物纤维主要由纤维素、半纤维素、木质素和果胶组成。相比之下, 动物纤维由蛋白质组成, 例如角蛋白或丝心蛋白, 而矿物纤维主要基于石棉。

主要由于其有益的特性, 天然纤维在环保复合材料的开发中受到了广泛关注。有益的特性包括低成本、低密度、灵活性、可再生性和可回收性。目前, 一些研究人员正在研究由地质聚合物混凝土和天然纤维 (如竹、棉和麻) 所组成的生物基建筑材料。

Tan 等人研究了偏高岭土地质聚合物与不同类型的木材和非木材纤维的相容性和由此产生的弯曲强度。研究表明, 在大多数情况下, 使用 5 wt. % 的木纤维抗弯强度值比使用 5 wt. % 非木材纤维的抗弯强度值更高, 前者为 5.3 至 9.1 MPa, 后者为 1.9 至 6.4 MPa。Assaedi 等人制造了基于粉煤灰的地质聚合物复合材料, 该复合材料用不同数量的棉 (0、1.4、2.1、2.8 和 4.1 wt.%) 和亚麻纤维 (0、2.4、3.0 和 4.1 wt.%) 增强。他们的报告说, 在添加 4.1 wt. % 亚麻纤维之后, 抗弯强度从 4.5 MPa 增加到 23 MPa。在棉纤维的情况下, 在纤维含量为 2.1 wt. % 时达到最高的抗弯强度。超出该纤维含量, 棉纤维和地质聚合物基体之间较差的纤维-基体界面结合会降低机械强度。

Sankar 等人研究了用 5 wt. % 竹纤维来增强的地质聚合物复合材料。报告的平均抗弯强度约为 7.5 MPa。然而, 在扫描电子显微镜 (SEM) 图像上拉出的竹纤维表

明纤维基质结合较弱。萨里贝罗等人还研究了地质聚合物-竹复合材料。他们的样品在添加 5 wt. % 竹纤维后达到 23-30 MPa 的平均抗压强度和 6-25 MPa 的平均抗弯强度。与不含纤维的地质聚合物相比, 添加竹纤维导致抗弯强度增加和抗压强度降低。不含纤维的样品达到了约 4.5 MPa 的抗弯强度和 56 MPa 的抗压强度。

Natali Murri 等人使用偏高岭土、聚硅酸钾和氢氧化钾制造了羊毛-地质聚合物复合材料。他们的样品有 10 wt. % 羊毛纤维, 平均密度为 1.0 g/cm^3 。对于 10 wt. % 的羊毛纤维-地质聚合物复合材料, 抗压强度和抗弯强度据报道分别约为 8.6 MPa 和 5 MPa, 而具有 15 wt. % 羊毛纤维的复合材料的抗压 (8.3 MPa) 和抗弯 (4 MPa) 强度略低。

上述研究表明, 天然纤维增强地质聚合物复合材料的强度受所用植物纤维类型的影响, 很大程度上取决于粘合剂与纤维之间的界面结合。最后一个方面是在生物建筑材料中使用植物纤维的最大挑战之一。因此, Malenab 等人研究了化学处理蕉麻 (大麻) 纤维以提高与地质聚合物基质的粘合力的影响。在该研究中, 使用了不同类型的化学处理; (一) 用 NaOH 碱处理, (二) 硫酸铝 ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) 处理和 (三) 用 NaOH 碱处理, 再进行硫酸铝处理。FTIR 结果表明, 碱处理溶解了无定形和疏水性成分, 例如木质素、果胶和半纤维素。此外, 研究测试了化学处理对地质聚合物基体和纤维之间的力学性能和界面结合的影响。大麻纤维的加入主要提高了地质聚合物的弯曲强度。与不含纤维的地质聚合物 (2.8 MPa) 相比, 具有未处理纤维的地质聚合物的抗弯强度提高了高达 5.5 MPa, 而具有处理纤维的地质聚合物提高了高达 7.3 MPa。通过 SEM 对微观结构的研究表明, 由于在纤维表面形成了类似沸石的颗粒, 因此地质聚合物基质和处理过的纤维之间具有更好的粘附性。然而, 必须改进天然纤维的化学处理, 因为一些拔出部位表明某些区域的界面粘合不完全。这些结果也证实了 Zhou 等人的研究。碱处理的棉纤维地质聚合物与未经处理的棉纤维地质聚合物相比, 碱处理棉纤维地质聚合物的抗压强度和抗弯强度分别可提高 4.8% 和 11.5%。

四、地质聚合物泡沫混凝土

泡沫或加气混凝土属于轻质混凝土类别, 可根据 ACI 523.2R-96 定义为: “由波特兰水泥和/或石灰与硅质细粒材料 (如沙子、矿渣或粉煤灰) 组成的轻质产品, 与水混合, 形成具有均匀空隙或泡孔结构的糊状物。多孔结构基本上是通过包含由气体释放化学反应或空气或

其他气体的机械结合 (通常采用高压釜固化) 产生的宏观空隙而获得的。

根据 EN 206, 泡沫或加气混凝土的密度范围为 800 至 2000 kg/m^3 , 而普通混凝土的密度范围为 2000 至 2600 kg/m^3 。由于需要具有低碳足迹的可替代的、可持续的绝缘材料, 地质聚合物泡沫的开发在过去几十年中变得越来越流行。泡沫地质聚合物混凝土可以通过化学或机械发泡或通过合成泡沫的形成来制备。

如果应考虑将泡沫地质聚合物混凝土作为替代隔热材料, 则必须研究孔隙率、导热性和力学性能, 以提高隔热性能。特别是导热性是绝热材料的基本特性之一。它通常通过使用热流计设备进行研究, 该设备通过测量放置在两个不同温度板之间的样品中的热流来确定热导率。其他作者使用针式探针或热盘的瞬态方法。泡沫地质聚合物的热导率很大程度上取决于样品的微观结构, 因为泡沫地质聚合物的微观结构对材料的性能有显著影响, 因此对样品的表征非常感兴趣。研究泡沫地质聚合物的孔结构有多种方法, 通常是封闭型。因此, 根据 Ducman 和 Korat 的说法, 诸如压汞法 (MIP) 的液体渗透方法仅限于研究泡沫地质聚合物的孔径分布。在低压下, 它无法到达封闭的孔隙, 在高压下, 它会破坏孔隙之间的细胞壁。因此, MIP 通常由其他方法补充。大多数作者使用样品横截面的光学显微镜或扫描电子显微镜 (SEM) 和微型计算机断层扫描 ($\mu\text{-CT}$) 作为非破坏性方法来研究不同参数的影响, 例如活化剂浓度或数量和类型发泡剂对孔隙率、孔径、孔径分布和泡沫地质聚合物中孔隙形态的影响。此外, 抗压和抗弯强度等力学性能与泡沫地质聚合物的孔隙率和微观结构密切相关, 许多研究都集中在不同参数 (如粉煤灰、偏高岭土或发泡剂含量) 对这些性能的影响。

五、化学发泡

对于化学发泡方法, 将发泡剂与其他混凝土成分混合以产生由于气体释放反应而产生的空隙。用于化学发泡的最常见的发泡剂是过氧化氢 (H_2O_2) 和铝粉 (Al)。在铝粉的情况下, 根据以下氢释放反应产生空隙。相反, 过氧化氢在碱性介质中分解成水和氧气; 因此, 氧气的释放导致气孔的形成。

诺维斯等人使用飞灰作为硅铝酸盐源和不同量的 H_2O_2 (0.03 至 1.2 % 重量) 作为发泡剂合成泡沫地质聚合物。用光学和 SEM 显微镜对微观结构的分析表明, 随着 H_2O_2 量的增加, 孔隙率增加。因此, 密度、热导率和抗压强度降低。此外, Novais 等人已经表明, 地质聚

合速率仅取决于碱溶液的浓度和固/液比。相反,发泡剂的掺入不影响地质聚合速率。Petlitchkaia 等人还研究了过氧化氢含量对地质聚合物的微观结构和机械性能的影响。 H_2O_2 含量除了影响密度、孔隙率、导热系数和抗压强度外,还影响地质聚合物泡沫的孔径。孔径(500至3000 μm)随着 H_2O_2 量的增加(0.25至2.5 wt. % v/v)而增加。

Hajimohammadi 等人最近的一项研究,研究了化学发泡的调节,以在不增加发泡剂用量的情况下,增加粉煤灰基泡沫地质聚合物的孔隙率。铝的含量可以通过改变碱活化剂氢氧化钠和硅酸钠的比例来控制。因此,较高的 $NaOH/Na_2SiO_3$ 比率会导致较高的孔隙率。

六、机械发泡

机械发泡技术又分为混合发泡和预发泡。在混合发泡法中,加入表面活性剂后,在混合过程中会产生泡沫。相反,在预发泡方法中,将预制泡沫与混凝土浆混合。

Hajimohammadi 等人报告了他们对于泡沫地质聚合物混凝土的研究,该混凝土基于粒状高炉矿渣(GBFS),通过将预制泡沫混合到地质聚合物混合物中合成。制备了三种不同地质聚合物混合物与相同数量的预制泡沫,以研究 H_2O/Na_2O 比和 Si/Al 比对最终泡沫地质聚合物性能的影响。不同混合物的 XRD 结果表明,具有较高 Si/Al 比的样品表现出少量的晶体结构。然而,在 H_2O/Na_2O 比率较高的样品中可以观察到结晶度增加。水量的增加还导致孔径分布的不均匀性差、导热率降低并降低最终地质聚合物的早期强度。相反,较低的 Si/Al 比导致较高的强度。

七、句法泡沫

除了化学和机械发泡技术外,泡沫混凝土还可以通过将空心球嵌入粘合基质中来制造。这些所谓的复合泡沫表现出吸引人的机械和热性能。用于复合泡沫的最常见的空心球是漂珠、空心玻璃微球、空心聚合物微球以及陶瓷和金属空心颗粒。值得注意的是,充气或惰性气体填充的空心微珠由于其有益的特性而可用于合成复合泡沫的制造。有益特性包括重量轻、尺寸小和球形。

八、纤维增强泡沫地质聚合物混凝土的开发

与加气混凝土一样,泡沫地质聚合物混凝土的性能也可以使用添加剂来改善。值得注意的是,纤维对机械性能有很大的影响。然而,如今,泡沫地质聚合物混凝土中最常用的纤维是合成纤维,如聚丙烯、聚乙烯醇或玄武岩纤维。只有少数研究集中在天然纤维增强泡沫地质聚合物混凝土的开发上,主要基于蕉麻或大麻纤维的使

用。

里卡德等人使用 1 wt. % 聚丙烯纤维和不同量的铝粉作为发泡剂(0.02、0.04 和 0.06 重量%)来制造纤维增强偏高岭土基泡沫地质聚合物混凝土。他们报告说添加了 0.06 wt. % 铝粉导致 $1.0 g/cm^3$ 的密度和约 $0.26 W/(m K)$ 的热导率。然而,大量的发泡剂导致大孔的存在增加,因此抗压强度为 9.5 MPa。在未发泡样品中添加纤维也会导致抗压强度和密度降低。不含纤维的未发泡地质聚合物样品的抗压强度为 54 MPa,密度为 $1.61 g/cm^3$,而含纤维的样品的抗压强度为 36 MPa,密度为 $0.7 g/cm^3$ 。Masi 等人研究了用 1 vol.-% 聚乙烯醇(PVA)或玄武岩纤维增强并使用过氧化氢和未说明的表面活性剂发泡的飞灰地质聚合物。他们假设与单独使用发泡剂的发泡样品相比,过氧化氢和表面活性剂作为发泡剂的组合表现出更容易控制密度和孔隙率。表面活性剂起泡的样品的密度范围为 1.2 至 $1.7 g/cm^3$,用过氧化氢起泡的样品的密度范围为 0.9 至 $1.7 g/cm^3$,用过氧化氢和表面活性剂起泡的样品的密度范围为 0.7 至 $1.7 g/cm^3$ 。此外,他们报告了纤维增强和泡沫地质聚合物样品在火灾条件下的行为。与玄武岩纤维增强的地质聚合物相比,PVA 纤维(厚度:50 毫米)增强的地质聚合物在模拟火灾条件下在 100 分钟内表现出更高的抵抗力。

Lee 等人制造了用碳纤维(0.3、0.5 和 0.7 wt.%)增强并用过氧化氢发泡的轻质偏高岭土地质聚合物,密度为 $415-431 kg/m^3$,热导率为 $0.06-0.07 W/(m K)$,并报告 $1.5-1.9 MPa$ 的抗弯强度。Abdollahnejad 等人研究了具有不同量聚丙烯(PP)纤维(0.2、0.6、1.0 和 1.4 vol.%)和发泡剂(0.2、0.5 和 0.8 vol.%)的粉煤灰基泡沫地质聚合物的干燥收缩率和机械性能)以及不同尺寸的 PP 纤维(6 毫米和 20 毫米)。发泡剂增加至 0.8 vol. % 导致干燥收缩率增加高达 50% 并降低机械性能,而添加长度为 6 毫米的 PP 纤维可减少高达 45% 的干燥收缩率并改善机械性能。

一些研究人员还使用大麻或蕉麻等天然纤维来增强泡沫地质聚合物混凝土。Galzerano 等人研究了轻质地的地质聚合物混凝土,用大麻纤维加固,用作绝缘材料。大麻地质聚合物是通过将大麻纤维网格添加到由偏高岭土和硅酸钠组成的浆料中合成的。为了获得泡沫地质聚合物,使用了由硅金属粉末和植物表面活性剂的混合物组成的发泡剂。SEM 图像显示了用大麻纤维增强的泡沫地质聚合物的断裂面。地质聚合物体系的高碱性 pH 值导致对纤维进行化学处理,因此观察到地质聚合物基

质和大麻纤维之间的强粘附性。由于纤维表面的蚀刻, 更高的放大倍数尤其表现出基质和纤维之间极好的界面结合。Ngo 等人使用过氧化氢作为发泡剂和蕉麻纤维作为增强材料制造了轻质地质聚合物混凝土。抗压强度范围为 19.56 至 36.85 MPa, 抗弯强度值范围为 2.145 至 6.254 MPa。Triwulan 等人研究了用蕉麻纤维(粉煤灰重量的 0.4、0.6 和 0.8 wt.%) 增强的轻质粉煤灰地质聚合物混凝土。他们报告说, 蕉麻纤维的增加量高达 0.8 wt. % 导致抗压强度增加至 3.05 MPa 并降低孔隙率。随着纤维量的增加(0.4 到 0.8 wt.%), 总孔隙率值从 61% 降低到 57.5%。

结论

泡沫地质聚合物混凝土作为可持续隔热材料的发展是朝着更环保建筑迈出的重要一步。传统的绝热材料, 如挤压或膨胀聚苯乙烯、矿棉、泡沫或加气混凝土, 有几个缺点, 包括高内涵能源、基于不可再生资源和高二氧化碳排放。本综述描述了与纤维增强泡沫地质聚合物混凝土相关的最重要的研究成果, 包括天然纤维、发泡方法和最近为减少地质聚合物混凝土中的纤维降解所做的努力。结果表明, 添加天然纤维(例如蕉麻和大麻)可提高泡沫地质聚合物的抗弯和抗压强度以及导热性。此外, 天然纤维和纳米颗粒的组合导致地质聚合物基质内的纤维具有更高的耐久性。然而, 这些复合材料面临许多挑战, 例如提高纤维与基体的粘合力或泡沫稳定性。此外, 天然纤维的可变质量、成分和机械处理也使研究工作之间的比较变得困难。因此, 关于最近对可持续替代品的推动, 需要进一步研究以用天然纤维增强泡沫地质聚合物混凝土代替传统的隔热材料。有前途的方法是对纤维进行化学处理、天然纤维和纳米粒子的组合以及使用调整后的发泡方法。本文未对天然纤维增强泡沫地质聚合物混凝土的生命周期评估和耐火性进行综述, 但在一些研究中已经注意到它们, 并且可能代表基于天然纤维和泡沫地质聚合物的可持续绝缘材料的开发面临的挑战。

参考文献:

- [1]Ducman, V.; Korat, L. Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H₂O₂ as foaming agents. *Mater. Charact.* 2016, 113, 207 – 213.
- [2]Novais, R.M.; Ascensão, G.; Buruberri, L.H.; Senff, L.;

Labrincha, J.A. Influence of blowing agent on the fresh- and hardened-state properties of lightweight geopolymers. *Mater. Des.* 2016, 108, 551 – 559.

[3]Petlitchkaia, S.; Poulesquen, A. Design of lightweight metakaolin based geopolymer foamed with hydrogen peroxide. *Ceram. Int.* 2019, 45, 1322 – 1330.

[4]Wang, M.-R.; Jia, D.; He, P.-G.; Zhou, Y. Microstructural and mechanical characterization of fly ash cenosphere/metakaolin-based geopolymeric composites. *Ceram. Int.* 2011, 37, 1661 – 1666.

[5]Shao, N.-N.; Liu, Z.; Xu, Y.-Y.; Kong, F.-L.; Wang, D.-M. Fabrication of hollow microspheres filled fly ash geopolymer composites with excellent strength and low density. *Mater. Lett.* 2015, 161, 451 – 454.

[6]Cui, Y.; Wang, D. Effects of Water on Pore Structure and Thermal Conductivity of Fly Ash-Based Foam Geopolymers. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2019, 2019, 1 – 10.

[7]Sankaran, S.; Ravishankar, B.N.; Sekhar, K.R.; Dasgupta, S.; Kumar, M.N.J. Syntactic Foams for Multifunctional Applications. In *Fracture Mechanics*; Springer Science and Business Media LLC: Berlin, Germany, 2016; pp. 281 – 314.

[8]Baduge, S.K.; Mendis, P.; Nicolas, R.S.; Nguyen, K.; Zhang, L. Performance of lightweight hemp concrete with alkali-activated cenosphere binders exposed to elevated temperature. *Constr. Build. Mater.* 2019, 224, 158 – 172.

[9]Shunmugasamy, V.C.; Pinisetty, D.; Gupta, N. Composites with tunable electrical, thermal and mechanical properties: An approach to multifunctionality. In *Proceedings of the 29th Annual Technical Conference of the American Society for Composites*, La Jolla, CA, USA, 8 – 10 September 2014.

[10]Krämer, C.; Azubike, O.M.; Trettin, R.H. Reinforced and hardened three-phase-foams. *Cem. Concr. Compos.* 2016, 73, 174 – 184.

[11]Rickard, W.D.; Vickers, L.; Van Riessen, A. Performance of fibre reinforced, low density metakaolin geopolymers under simulated fire conditions. *Appl. Clay Sci.* 2013, 73, 71 – 77.