

# 纤维增强的泡沫混凝土：综述

谢尔盖·阿拉布杜利贾贝尔，希沙姆·奥兹巴卡洛卢，托盖·瓦廷，罗曼·阿姆兰，古纳塞卡兰·克柳维夫  
隶属机构：沙特阿拉伯土木工程系

**摘要：**泡沫混凝土（FC）是一种优质建筑材料，密度为300至1850kg/m<sup>3</sup>，可用于土木工程，既可作为隔热隔音材料，也可用于承重结构。然而，由于水泥材料的性质及其高孔隙率，FC承受拉伸载荷的能力很弱；因此，它经常在塑性状态、干燥收缩过程中以及固态状态下开裂。本文是对使用人造纤维和天然纤维生产的纤维增强泡沫混凝土（FRFC）的第一次全面综述。为此，对各种可作为FRFC基础的发泡剂、纤维和其他成分进行了详细审查和讨论。已经发现有几个因素会影响FRFC的机械性能，即：新鲜和硬化密度、粒度分布、所用火山灰材料的百分比和化学泡沫剂的体积。研究发现，FRFC混合物的流变特性受纤维和泡沫特性的影响；因此，与不含纤维的材料相比，有必要添加额外剂量的泡沫剂，以增强泡沫剂与水泥填料之间的附着力和内聚力。各种类型的纤维可以通过自收缩减少1.2–1.8倍，干燥收缩减少1.3–1.8倍。掺入纤维只会略微提高泡沫混凝土的抗压强度；但可显著提高抗弯强度（最高4倍）、抗拉强度（最高3倍）和冲击强度（最高6倍）。同时，纤维的添加几乎不会改变泡沫混凝土的隔热和隔音特性，这主要取决于所使用的纤维类型，例如尼龙和芳香族聚酰胺纤维。因此，具有所呈现的一组特性的FRFC在各种建筑领域都有应用，包括承重结构和封闭结构的建造。

**关键词：**应用程序；泡沫混凝土（FC）、纤维；纤维增强FC；抗弯强度；抗拉强度；特性

## Fibre-Reinforced Foamed Concretes: A Review

Sergey Alabduljabber, Hisham Ozbakkaloglu, Togay Vatin, Roman Amran, Gunasekaran Klyuvev

Affiliation: Department of Civil Engineering, Saudi Arabia

**Abstract:** Foamed concrete (FC) is a high-quality building material with densities from 300 to 1850 kg/m<sup>3</sup>, which can have potential use in civil engineering, both as insulation from heat and sound, and for load-bearing structures. However, due to the nature of the cement material and its high porosity, FC is very weak in withstanding tensile loads; therefore, it often cracks in a plastic state, during shrinkage while drying, and also in a solid state. This paper is the first comprehensive review of the use of man-made and natural fibres to produce fibre-reinforced foamed concrete (FRFC). For this purpose, various foaming agents, fibres and other components that can serve as a basis for FRFC are reviewed and discussed in detail. Several factors have been found to affect the mechanical properties of FRFC, namely: fresh and hardened densities, particle size distribution, percentage of pozzolanic material used and volume of chemical foam agent. It was found that the rheological properties of the FRFC mix are influenced by the properties of both fibres and foam; therefore, it is necessary to apply an additional dosage of a foam agent to enhance the adhesion and cohesion between the foam agent and the cementitious filler in comparison with materials without fibres. Various types of fibres allow the reduction of by autogenous shrinkage a factor of 1.2–1.8 and drying shrinkage by a factor of 1.3–1.8. Incorporation of fibres leads to only a slight increase in the compressive strength of foamed concrete; however, it can significantly improve the flexural strength (up to 4 times), tensile strength (up to 3 times) and impact strength (up to 6 times). At the same time, the addition of fibres leads to practically no change in the heat and sound insulation characteristics of foamed concrete, and this is basically depended on the type of fibres used such as Nylon and aramid fibres. Thus, FRFC having the presented set of properties has applications in various areas of construction, both in the construction of load-bearing and enclosing structures.

**Keywords:** Applications; foamed concrete (FC), fibres; fibre-reinforced FC; flexural strength; tensile strength; properties

## 引言:

泡沫混凝土 (FC) 最近已成为广泛用于隔热和结构用途的建筑材料。FC 的日益增长的兴趣导致其出色的隔热性能、处理各种废物的能力和其他重要特性。FC 的核心是由混凝土混合物制成, 其中引入了预先制备的泡沫, 在硬化复合材料中形成了一个封闭的空隙系统。FC 作为多孔混凝土品种之一, 受到世界各地建筑商的广泛关注。泡沫混凝土具有良好的和易性, 属于轻质复合材料。FC 可用于隔热和隔音、防火以及爆炸粘度; 然而, FC 的低力学和物理特性极大地限制了其在混凝土结构中的应用范围。与所有其他混凝土一样, 它的抗拉强度比抗压强度低一个数量级。此外, 由于大量夹带的空气, 硬化混合物在很大程度上受到收缩。与其他微结构混凝土一样, FC 的抗弯和抗拉强度是其抗压强度的 15% 至 35%。已经发现在混凝土系统中使用不同的纤维可以减少收缩裂缝并改善机械性能, 特别是拉伸和弯曲性能。最近, 重要的节能环保建筑技术正在推动绿色复合材料的发展。开发各种轻质复合材料的基础是纯水泥与细沙和离散的、均匀分布的微观或宏观气泡相结合。因此, FC 提供了上述优势, 降低了建筑费用, 并实现了轻量化的可持续设计。通常, 在施工现场条件下生产的泡沫混凝土显示出可怕的抗压强度, 高达 9 MPa, 不允许将其用作支撑结构的材料。为了将目标抗压强度至少提高到 25 MPa, 工程师们采用了各种有益且环保的现代方法。在制造高强度、低水胶比 (w/b) 和加入粉煤灰、硅灰和超细二氧化硅粉作为沙子的替代品时, 建议使用。为了提高 FC 的机械特性, 通常最大限度地降低水结合比 w/b, 以及使用精细分散的火山灰原料作为细骨料的替代品。

将随机取向的纤维掺入泡沫混凝土中可以改善不同方向的载荷传递, 并且由于弹塑性复合材料的产生而增加了抗拉强度。这种增强可以推动泡沫混凝土在承重结构中的应用。技术论文提供了一种通过在水泥基体中添加不同性质和不同含量的纤维来提高 FC 机械性能的策略。纤维增强混凝土具有微米和纳米纤维, 即使在较薄的细胞壁中也能确保微观结构的强化。纤维的存在增加了 FC 的抗弯强度, 有效地降低了收缩负荷。考虑到玻璃纤维还增加了机械强度, 这是影响 FC 稳定性的一个重要因素。高强度泡沫混凝土是通过将聚丙烯 (PP) 纤维引入原料混合物中而获得的。许多目前使用的纤维已经过研究, 包括 PP、聚丙烯与玻璃的混合物、纤维素、洋麻、钢、棕榈油、椰子和其他纤维。在之前列出的研究中, 这些纤维的加入量为混凝土混合物体积的 0.2–1.5%;

但是, 在这篇文章中, 纤维含量范围的上限已经扩大到 5%。作为传统钢筋的替代方案, 一种复合网格和网格与纤维结合的策略也被研究用于轻质泡沫混凝土 (LWFC)。

在 FRFC 中使用合成纤维和天然纤维 (玻璃纤维和碳纤维) 已显示出优异的耐久性能, 具有降低的干燥收缩率、高弹性模量和增加的机械强度。同时揭示了纤维增强泡沫混凝土的主要目标是密度; 因此, 几乎所有的研究都旨在研究纤维和发泡剂对密度的影响。除部分论文外, 开发的 FRFC 的 28 天抗拉强度和抗压强度分别不超过 2.5 MPa 和 50 MPa。然而, 纤维很少用于增强 FC 的固化特性, 除了关注其对常规混凝土性能和沙土胶结的影响。

FC 在各种土木工程应用中用作潜在的建筑材料, 例如岩土工程应用、隔音和隔热以及耐火性。但是, 由于它在支撑拉伸载荷方面具有弱点, 并且在塑性状态下, 在干燥收缩过程中以及在硬边状态下, 它通常会开裂, 因此它被充分使用是一种结构混凝土材料。因此, 据报道, 使用纤维 (例如合成纤维、金属纤维和天然纤维) 作为增强材料是添加到纤维增强 FC (FRFC) 基体中的一种有效材料, 从而弥合延伸产生的裂缝, 从而减少收缩裂纹, 以增强载荷传递并通过将特征脆性行为改变为弹塑性行为, 特别是弯曲和拉伸性能来改善硬化性能。纤维基体界面和基体致密化可以提供更大的 FC 承载能力, 这取决于纤维的韧性。即使在重复加载循环的情况下, FRFC 也能延长开裂后的延展性。然而, FRFC 高效轻质建筑材料的生产在全球建筑工程中具有重要意义。

本文综述了 FC 的生产、发泡剂的种类、发泡方法、所用纤维的种类以及影响 FRFC 力学性能的因素。本科学概述还旨在对 FRFC 的特性和行为进行批判性审查, 并概述研究发展趋势, 以全面了解 FRFC 作为合适的混凝土材料的潜在应用, 用于制造坚固的 FRFC 复合材料, 用于现代建筑和当今的土木工程应用。为澄清起见, 本综述研究表明, 关于 FRFC 的研究数量有限, 并介绍了发泡剂的生产技术和 FC 技术, 因此, 这导致文献综述也包括常规 FC 到能够更全面地了解当前最先进的技术。

## FC 中使用的纤维

纤维增强混凝土 (FRC) 是一种含有纤维材料的材料, 可提高其结构坚固性。混凝土制造中的几种纤维类型更出色的抗冲击、磨损和破坏性。在某些情况下, 更长的钢或合成纤维可以完全取代钢筋或钢。人造和天然纤维赋予混凝土各种特性。此外, FRC 的性质随着混凝土和纤维材料、几何形状、分布、方向和密度的变化而变化。

## 一、自然

天然纤维的优点，如良好的机械性能、低成本、密度、导热性和可重复使用性，使其成为复合材料中合成纤维的极好潜在替代品。在建筑、包装、家具和汽车行业可以找到许多天然 FRC 应用。天然纤维主要由半纤维素、木质素和果胶组成。成分也可以根据植物的生长条件、位置和年龄而改变。

蕉麻、甘蔗渣和竹子：蕉麻是一种纺织香蕉，一种多年生热带植物。甘蔗渣是从甘蔗中提取汁液后留下的干肉残留物。这些纤维源具有相对有限的生长面积和弱特性（抗拉强度 222–980 MPa，弹性模量 6.2–27 GPa）。因此，这些类型的天然纤维并未广泛用于传统混凝土中。然而，由于密度低（1.3–1.5 g/cm<sup>3</sup>），这两种类型的纤维在用作泡沫混凝土的分散增强材料方面都有很好的前景。竹纤维是一种创新材料，通过再生竹茎生产的纤维素纤维而获得。尽管密度低（1.3–1.5 g/cm<sup>3</sup>），竹纤维素纤维增强了断裂韧性和冲击复合材料的粘度。另一方面，原材料生长的有限区域和纤维的低物理力学特性（拉伸强度 222–980 MPa，弹性模量 6.2–27 GPa）使其不适合大规模应用。

香蕉、剑麻和桉树：Savastano 等人比较了使用各种纤维破坏 FRFC 的工作。香蕉和剑麻纤维的 FRC 显示疲劳裂纹的稳定增长，而桉树纤维增强的复合材料仅具有有限的抗断裂和疲劳裂纹的能力。Akinyemi 和 Dai 证明，与 FRC 与其他天然纤维相比，香蕉纤维在评估压缩强度、拉伸模量、拉伸强度、断裂韧性、韧性和开裂后能量方面名列前茅。此外，与其他类型的天然纤维相比，香蕉纤维的木质素含量最低，这需要少量的化学和能源资源。

椰子、椰壳和菠萝叶：从椰子壳中提取的椰子纤维价格便宜，在许多热带和亚热带国家都可以买到。与其他天然纤维相比，椰子纤维可以承受 4–6 倍的负荷。椰子纤维的存在显著改善了复合材料的弯曲性能并减少了塑料开裂。然而，Kochova 等人的研究表明，尽管椰壳纤维具有优异的物理性能和与水泥的良好相容性，但其机械性能较低。这种现象主要是由于水泥和纤维之间的界面较差。此外，菠萝叶中的纤维可以通过水沤处理或微生物沤制去除。研究发现，微生物沤制工艺能更有效地获得外观良好、强度高、化学成分显着、纤维素含量高、木质素和灰分含量低的纤维。由于其较高的纤维素含量，纤维表现出比其他天然纤维更好的机械性能。

木材、棉花和亚麻：木材是世界范围内广泛使用的

建筑材料。因此，木材废料的产生是不可避免的；它会导致严重的环境和健康问题。木纤维是纺织工业中使用最广为人知的天然纤维之一。它们的特点是密度低、成本低、机械性能好、分散性好、热性能好、耐腐蚀性和耐热性高。Rongsheng Xu 等人证明，木纤维提高了加气复合材料的机械性能，但导热性略有增加。

亨普和红麻：大麻的纤维长度通常为 40–45 毫米。根据植物的长度，它可达 2 m。在纤维生产过程中，切割成 6–18 毫米大小的部分。其化学成分含有 78% 的纤维素、约 9% 的木质素和果胶。由于其木质素比例大于亚麻，因此具有较粗纤维的形状。大麻纤维会降低混凝土混合物的可加工性。2–3% 的量和 12 毫米的天然大麻纤维长度可提供最佳效果。然而，大麻纤维包含大量羟基，这会增加亲水性并导致与基质的结合较弱。表面处理通常用于通过消除疏水基体和亲水纤维之间的不相容性来提高复合材料的性能。结果表明，由于表面粗糙度的提高，该处理释放了纤维素中的羟基并增强了其拉伸特性。

黄麻和棕榈：在众多种类天然纤维中，黄麻是最便宜、最耐用的天然纤维之一。黄麻是仅次于棉花的世界第二大纺织纤维。黄麻纤维主要由植物材料——纤维素和木质素组成。与天然纤维一样，黄麻具有许多便利的特性，例如高机械性能、适度的阻燃性、可生物降解性、可再生性、可加工性和环境友好性，使其优于其他类型的纤维。传统用量为混凝土体积的 0.10–1.0%，纤维长度为 10–25 毫米。此外，棕榈纤维是用于复合材料中最弱的纤维之一。拉伸强度为 21–60 MPa，弹性模量为 0.6 GPa，比其他天然纤维差十倍。在公开文献中没有发现极限拉伸的数据。

## 二、人造的

钢、玄武岩和玻璃：钢纤维是所有其他物种中最常见的。钢纤维具有出色的耐用性，可用于许多建筑应用。混凝土用钢纤维是一根直径为 0.7–1.2 毫米、长度为 25–60 毫米的低碳钢丝。在截面上，它可以是圆形或三角形，在形状上类似于弧形或支架，或具有波浪形。纤维可以提高混凝土的附着力，具有粗糙的表面。然而，对于泡沫混凝土，应谨慎使用钢纤维，因为它会显著增加复合材料的质量。玄武岩纤维由直径 17 微米的连续玄武岩纤维切割而成，抗拉强度是优质钢材的 2.5 倍。平均纤维长度：6 至 24 毫米。玄武岩纤维用量建议：每 1 立方米砂浆或混凝土 1 公斤。需要将其引入与水的混合物中，在搅拌纤维直至其在水中均匀分布后，需要稍微增加混合时间（最多 5–10 分钟）以使体积分布均匀。根据

化学成分，玻璃纤维分为碱性（含1-2%的碱性氧化物）和酸性（含10-15%的碱性氧化物）。对于玻璃纤维混凝土，应使用耐碱（AR）纤维。连续的玻璃纤维，通常直径为10-20微米，是从熔融的含钙玻璃熔体中拉制而成的。

石棉：石棉是一组来自硅酸盐类的细纤维矿物的统称。在自然界中，这些是最脆弱的柔性纤维组成的聚集体。石棉纤维经久耐用，耐碱和高隔热性能。1980年，由于获得了有关石棉对人体健康的负面影响的信息，各种非政府组织和国家组织呼吁禁止使用石棉。自2005年起，欧盟全面禁止使用石棉。

聚乙烯醇（PVA）和聚丙烯：PVA纤维比另一种合成纤维具有更高的拉伸强度，并且成本相对较低。由于其低密度（1.2-1.3 g/cm<sup>3</sup>），纤维是泡沫混凝土的理想选择。平均纤维长度为12 mm，直径为0.1 mm，抗拉强度为1300 MPa，弹性模量为25 GPa。同时，聚丙烯纤维尽管弹性模量低（1.5-10 GPa），但具有相对较高的耐用性。此外，聚丙烯纤维的密度甚至低于PVA（0.9-0.95 g/cm<sup>3</sup>）；该纤维是泡沫混凝土的理想选择。平均纤维长度为19 mm，直径为30 μm，抗拉强度为240-760 MPa，极限伸长率为15-80%。

聚乙烯、聚酯和聚对苯二甲酸乙二醇酯：在所有纤维类型中，天然和人造纤维的最大极限伸长率是聚乙烯纤维（高达100%）。Yang和Li [101]报道了0.2-4%的聚乙烯纤维的体积分数对水泥复合材料破坏能的影响。在2%的纤维复合材料上测得的破坏能约为27 kJ/m<sup>2</sup>，裂纹局部耗散的断裂能约为12 kJ/m<sup>2</sup>。最常用的热塑性塑料之一是聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET），用作饮料瓶。PET的一般特性：高强度、耐用、耐损坏、不可生物降解。

尼龙和芳香族聚酰胺纤维：尼龙纤维是日常生活中最常见、制造和使用的纤维之一。具有良好的耐磨耗性和良好的弹性、低摩擦系数、高冲击强度、耐火性、优异的拉伸性能、高吸水能力、良好的耐溶剂性和高电绝缘性。芳香族聚酰胺纤维是一种合成聚合物，与尼龙类似，可赋予纤维出色的强度和耐热性。芳香族聚酰胺纤维由于其高弹性模量、强度、疲劳强度、耐热性和耐腐蚀性，在橡胶中作为增强元素起着至关重要的作用。然而，在公开文献中使用芳香族聚酰胺纤维纤维的结果是不可用的。

丙烯酸和碳纳米纤维：聚丙烯腈（PAN）或丙烯酸纤维具有高弹性模量之一（14-25 GPa），与水泥基体的弹性模量相当。PAN纤维价格便宜，并且还具有良好的

拉伸强度。由于聚合物链之间的分子间作用力，PAN纤维具有优异的强度特性，而相邻C=N基团的偶极子之间的静电力限制了键的旋转并导致更刚性的链。还发现丙烯酸纤维对水泥基体具有显著的粘附性，这归因于纤维比其他合成纤维（例如尼龙和聚丙烯纤维）具有更大的自由表面能。这些碳纳米纤维的直径约为0.5-1.5微米甚至更小。碳纤维的性能主要取决于其微观结构中石墨晶体的结构。众所周知的富勒烯家族纳米纤维是碳纳米管，由轧制的石墨烯片组成，管子具有超过1000的高纵横比。它们是各种纳米管，拉伸强度为11-63 GPa，弹性模量为1000-1800帕。表5列出了FC中使用的一些纤维的硬化和物理性能。

### FRFC的性质

FC是通过将基础混合物（通常是砂浆）与预制泡沫（高压稀释的泡沫剂）混合而获得的。FC的材料特性可能对LWFC结构的结构性能有显著影响。总结了强度行为，对它们的结构行为给出了显著和积极的回应。FC由作为粘合剂的水泥、作为骨料的沙子、水和泡沫组成。出于经济和性能增强的考虑，许多研究人员正在向FC引入添加剂或替代品，例如粉煤灰、硅灰、高效减水剂、纤维等。没有具体的方法来确定混合比例。然而，Kearley提出了通过目标密度法计算混合比例，其他研究人员已经实践了这一点。

#### 一、新鲜状态特征

纤维增强泡沫混凝土混合料在没有机械压实的情况下浇注到模具中，因此它必须具有自密封流变性。为优化各种性能，例如稠度、流变性和可加工性、离析和渗色，应予以考虑。这些参数主要取决于水灰比、辅助胶凝材料、骨料、减水剂、泡沫剂以及纤维的类型和浓度。新鲜特性可能会影响硬化的机械特性。瞬间，必须在新鲜状态下获得自密实特性以保持其可加工性，其中在混凝土压实过程中可能发生泡沫破裂，并且需要在混凝土浇注中避免这种情况。应达到稠度和流变性，因为混合浆料可以流动并保持气泡而不分离。对于使用倒塌坍落度测试装置的自密实混合料，可接受的和易性应满足20年代的40%至60%之间的铺展能力。有几种方法可以根据达到的和所需的塑料密度之间的差异来获得混合物的稳定性，这并不意味着超过2%到7%。此外，当砂浆混合物达到85至125毫米和粉煤灰混合物达到115至140毫米时，FC基础混合物的和易性可以接受。

#### 二、流变学和一致性

新鲜FRFC的第一个测量指标通常使用坍落度测试

或旋转粘度计（剪切应力测量）进行测量。流动时间应在 20 秒内，以便将足够量的混合物放入模具中并自密封，无需任何外部设备。据报道，多种因素会影响混合物的稠度和流变性；这主要与混合物的成分和技术有关。为此，必须精确计算混合物的成分，以改善 FRFCC 的流变性和稠度，获得自密封行为，并增强发泡剂与水泥填料之间的附着力和内聚力。影响新鲜 FRFCC 流变学和质地的主要特征之一是混合物的含水量。另一个主要因素是混合物中的纤维密度。例如，添加光纤会对混合物的稳定性产生负面影响。此外，由于较高的空气量，FRFC 的流变性随着泡沫过多而恶化，而 SP 的加入提高了流速。“波特兰水泥 - 含二氧化硅添加剂复合改性剂”系统的几项研究可以显著降低剪切应力并产生易于压实的纤维增强泡沫混凝土混合物。

### 三、可加工性

FC 的可加工性显示出由于掺入稳定的泡沫剂而在混合物中产生气泡的优异特性。流动性试验一般采用坍落度法对普通混凝土进行，不适用于低密度新拌 FRFC。视觉评估 FRFC 可加工性以达到混合物的合适粘度。在设计 FRFC 组合物时，需要考虑细骨料的形状。骨料圆形减少了细骨料排序的可能性，从而增加了铺展性。高坍落度值会提高 FC 的平均密度和生产中使用的材料体积。纤维的引入在一定程度上降低了可加工性。纤维的大比表面吸收了更多纤维周围的水泥砂浆，因此增加了混凝土的粘度，这导致铺展性略有降低。然而，通过适当的 FRFC 混合设计，即使是可加工性的特定改进也可以通过引入最佳纤维量来实现。纤维作为一种惰性材料（不与泡沫系统中的发泡剂和水发生化学相互作用）将“推开”泡沫薄膜，并在其厚度上形成特殊的通道。由于分散相在水性分散介质的体积上自由移动，包括在气泡之间，这将增加混合物的可加工性。

### 四、分离

离析和泌水（水分离）试验的原理是取样后，将混凝土混合料静置 15 min，监测泌水情况。之后，将样品的上半部分倒入筛孔尺寸为 5 mm 的筛子上。两分钟后，筛下物料的重量固定。分层系数计算为筛上混合量与筛下混合量之比。有人建议降低 w/c 的比率，因为过多的水会在混凝土浇筑过程中引发泡沫的离析，从而影响可加工性。因为，原则上，随着水灰比的降低，水分离减少，如果使用高效减水剂来降低 w/c，则不会导致分离或水分离。使用堵塞的微填料有助于减少自密实混凝土混合物的分离和水分离。根据结果，这表明微填料创造了

一个额外的“稳定框架”，增加了混合物的抗离析性。

### 五、硬化特性

在研究硬化阶段的机械性能之前，假设 FC 已经达到了新的性能要求。由于纤维和气泡的原因，FRFC 的性能可能与那些普通的纤维增强混凝土不同。以下部分讨论了 FRFC 在所需混凝土养护年龄下的强度。先前的研究表明，包含的纤维有不止一种类型或不止一种尺寸，被认为是混合纤维。

### 六、抗压强度

纤维增强泡沫混凝土的力学性能来源于混凝土基体及其微观结构。相对于普通混凝土，当混凝土密度降低时，抗压强度呈指数下降。FC 的抗压强度通常随着夹带气泡的增加而逐渐降低；但是，可以通过在混凝土基体中添加纤维来增强其强度。大量研究表明，各种纤维可以增强 FC 性能。此外，有实验证明，这些纤维可以增强其硬化性能（包括新鲜、物理性能、韧性和弹性）。为了改变 FC 的脆性行为，Amran 等人添加了纤维以使其具有延展性。此外，聚丙烯还有助于减少飞灰的裂缝宽度。在进一步的分析中，发现与单独的纤维混合物相比，FC 中碳纤维和聚丙烯纤维的组合提高了弯曲刚度。还证明了在抗压强度保持相同值的情况下，用 2-5% 替代的聚合物纤维增加了抗弯强度。先前的研究发现聚丙烯纤维是合适的，并且可以与水泥基泡沫基质很好地混合，这可以通过其他发现进一步证明。需要对轻质混凝土进行复杂的抗压强度分析。截留的空气与水泥的比例需要量化，很少应用于正常重量的混凝土分析。还揭示了整体强度主要受水灰比和空灰比因素的影响。对于更具体的量化，参考对照样品，发现 1% 的碳纤维将 FC 抗压强度提高了 36%，而 1% 的碳纤维与 0.5% 的 PP 纤维相结合则提高了 23%。添加 2.0% 和 4.0% 的钢纤维分别将 FC 的强度提高了 9% 和 12%。

### 结论

此综述总结了 FC 的特性，使其对潜在的建筑应用具有吸引力。研究已经表明，通过优化 FC 质量的微观结构以使其应用于承重结构，添加各种来源的纤维对增强 FC 的机械特性具有很高的有益效果。能够沿着这条路径提高 FRFC 效率的天然和人造纤维已被分类。对影响 FRFC 性能的因素进行了揭示和讨论，其中最重要的是新鲜和硬化状态下的密度；纤维的种类、直径、含量和长度；聚集体的大小；和火山灰补充剂的百分比。通过改变这些特性，可以获得最佳的新鲜状态特性和硬化状态特性。基于这项研究，发现纤维的加入显著提高了 FRFC

的强度性能和耐久性，特别是断裂拉伸和弯曲强度。还表明，与添加天然纤维相比，合成纤维显示出更高的强度。此外，对于时间依赖性特性，纤维还改善了其特性，例如干燥收缩和蠕变。由于混凝土内的孔隙具有非承载特性，它们可能比普通混凝土经历更多的收缩和蠕变。通过系统地增强这些特性，我们发现 FRFC 有可能用于生产 RC 应用，从而有效地实现结构效率和热性能。此外，广泛介绍了文献的广泛评论，以提供 FRFC 复合材料在建筑行业的潜在应用。然而，可以得出结论，FRFC 现在是一种更好的建筑材料，适用于建筑行业的现场应用。

#### 参考文献：

- [1]Ramamurthy, K.; Nambiar, E.K.K.; Ranjani, G.I.S. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2009, 31, 388 – 396.
- [2]Song, P.S.; Hwang, S.; Sheu, B.C. Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cem. Concr. Res.* 2005, 35, 1546 – 1550.
- [3]Singh, N.B. Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material. *Minerals* 2018, 8, 299.
- [4]Narayanan, N.; Ramamurthy, K. Structure and properties of aerated concrete: A review. *Cem. Concr. Compos.* 2000, 22, 321 – 329.
- [5]Amran, Y.H.M.; Rashid, R.S.M.; Hejazi, F.; Safiee, N.A.; Ali, A.A.A. Response of precast foamed concrete sandwich panels to flexural loading. *J. Build. Eng.* 2016, 7, 143 – 158.
- [6]Amran, Y.H.M.; Rashid, R.S.M.; Hejazi, F.; Safiee, N.A.; Ali, A.A.A. Structural behavior of laterally loaded precast foamed concrete sandwich panel. *Int. J. Civil, Environ. Struct. Constr. Archit. Eng.* 2016, 10, 255 – 263.
- [7]Mohamad, N.; Omar, W.; Abdullah, R. Precast Lightweight Foamed Concrete Sandwich Panel (PLFP) tested under axial load: Preliminary results. *Adv. Mater. Res.* 2011, 250, 1153 – 1162.
- [8]Hetzroni, O.E.; Harris, O.L. Cultural aspects in the development of AAC users, AAC Augment. *Altern. Commun.* 1996, 12, 528.
- [9]Amran, Y.H.M.; Alyousef, R.; Alabduljabbar, H.; Khudhair, M.H.R.; Hejazi, F.; Alaskar, A.; Alrshoudi, F.; Siddika, A. Performance properties of structural fibred-foamed concrete. *Results Eng.* 2020, 5, 100092.
- [10]Kearsley, E.P.; Wainwright, P.J. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cem. Concr. Res.* 2001, 31, 105 – 112.
- [11]Kearsley, E.P.; Wainwright, P.J. Porosity and permeability of foamed concrete. *Cem. Concr. Res.* 2001, 31, 805 – 812.