

泡沫混凝土保温性能影响因素分析

郭峰

江苏省泰州市同一建设工程质量检测有限公司, 江苏 泰州 225300

[摘要] 构建节约型社会是我国的一项重要政策目标, 而建筑节能则是实现这一目标的关键性工程。近年来, 建筑界不断努力研究新型建筑材料和方法, 以在市场上获得竞争优势。我国对建筑节能材料的研发越来越重视, 政策的支持和推动使得泡沫混凝土成为了广泛用于节能建筑的墙体材料。本文重点探讨了泡沫混凝土的特性和应用现状, 并介绍了其原材料和生产工艺。同时, 着重分析了三个影响泡沫混凝土保温性能的因素, 即原材料、工艺制度和养护。最后, 针对我国在泡沫混凝土应用方面存在的问题, 进行了展望。研究表明, 泡沫混凝土的导热系数主要受密度影响, 而材料的导热系数则与其分子结构、表观密度、内部结构、温度、含水率等因素有关。一般来说, 绝热密度越低, 材料的导热系数越小。在相同的成分、密度、温度和含水率下, 多孔材料的导热系数较低。此外, 在相同的孔隙率下, 孔隙尺寸较大的材料导热系数较大, 而孔隙相互连通的材料导热系数较高。因此, 泡沫混凝土的性能与其气孔及气孔壁的组成和结构密切相关, 而这又取决于原材料的性能和配合比。通过深入研究泡沫混凝土的性能和特性, 可以进一步提高其品质, 拓宽其在建筑行业中的应用领域, 从而更好地满足节能建筑的需求。泡沫混凝土的未来发展将受益于持续的研究和创新, 为我国建设节约型社会做出贡献。

[关键词] 泡沫混凝土; 保温性能; 影响因素

DOI: 10.33142/ec.v6i12.10386

中图分类号: TU528.2

文献标识码: A

Analysis of Factors Influencing Thermal Insulation Performance of Foam Concrete

GUO Feng

Jiangsu Taizhou Tongyi Construction Engineering Quality Testing Co., Ltd., Taizhou, Jiangsu, 225300, China

Abstract: Building a conservation oriented society is an important policy goal of our country, and building energy conservation is a key project to achieve this goal. In recent years, the construction industry has continued to make efforts to research new building materials and methods to gain competitive advantage in the market. China has paid more and more attention to the research and development of building energy saving materials, and policy support and promotion have made foam concrete widely used as a wall material for energy-saving buildings. This paper mainly discusses the characteristics and application status of foam concrete, and introduces its raw materials and production technology. At the same time, three factors affecting the thermal insulation performance of foam concrete, namely raw materials, process system and curing, are emphatically analyzed. Finally, the problems existing in the application of foam concrete in China are prospected. The research shows that the thermal conductivity of foam concrete is mainly affected by density, while the thermal conductivity of material is related to its molecular structure, apparent density, internal structure, temperature, moisture content and other factors. Generally speaking, the lower the absolute dry density, the smaller the thermal conductivity of the material. Under the same composition, density, temperature, and moisture content, the thermal conductivity of porous materials is relatively low. In addition, at the same porosity, materials with larger pore sizes have higher thermal conductivity, while materials with interconnected pores have higher thermal conductivity. Therefore, the performance of foam concrete is closely related to the composition and structure of its pores and pore walls, which in turn depends on the performance and mix proportion of raw materials. Through in-depth study of the performance and characteristics of foam concrete, its quality can be further improved, and its application in the construction industry can be expanded, so as to better meet the needs of energy-saving buildings. The future development of foam concrete will benefit from continuous research and innovation, and make contributions to building a conservation oriented society in China.

Keywords: foam concrete; thermal insulation performance; influencing factors

1 绪论

1.1 泡沫混凝土概述

1.1.1 泡沫混凝土的定义

泡沫混凝土是一种轻质混凝土材料, 其主要特点是在混凝土中通过混入空气泡沫, 使其具有较低的密度和较高的绝热性能。泡沫混凝土通常由水泥、砂子(或其他粒状

骨料)、发泡剂和水混合而成。其中, 发泡剂的作用是在混合过程中产生微小的气泡, 这些气泡分布均匀, 使混凝土变得轻盈且绝热性能良好。泡沫混凝土的密度通常较低, 因此它比普通混凝土更轻。它还具有一定的抗压强度, 可以用于各种建筑和工程应用, 如隔热材料、填充材料、轻质墙体、屋顶绝热层等。泡沫混凝土的特点还包括良好的

绝热性能,因此在一些需要绝热的应用中很受欢迎。总之,泡沫混凝土是一种通过混入空气泡沫而具有轻质和绝热性能的混凝土材料,适用于各种建筑和工程用途。

1.1.2 泡沫混凝土的分类

泡沫混凝土是一种多样化的建筑材料,其分类可基于多种因素进行划分。首先,根据其胶结材料的不同,泡沫混凝土可分为水泥泡沫混凝土、菱镁泡沫混凝土、石膏泡沫混凝土和火山灰质胶结材料泡沫混凝土等,其中水泥泡沫混凝土是最常见和广泛应用类型。其次,泡沫混凝土的分类也可依据所用主要填充料的种类进行,包括粉煤灰泡沫混凝土、矿渣泡沫混凝土、秸秆泡沫混凝土等。这些不同的填充材料赋予了泡沫混凝土不同的特性,适用于不同的工程需求和环境条件。此外,根据干燥后的密度,泡沫混凝土可以分为多个等级,如B03、B04、B05等,这些等级的选择取决于具体的应用场景和项目要求。泡沫混凝土还可以根据其使用功能来分类,包括保温型泡沫混凝土、保温结构型泡沫混凝土以及结构型泡沫混凝土。不同类型的泡沫混凝土在抗压强度、隔热性能等方面具有各自的优势。此外,泡沫混凝土还可以根据其应用领域进行分类,如房建泡沫混凝土、园林泡沫混凝土、工程泡沫混凝土和工业泡沫混凝土,适用于不同的建筑和工程项目。最后,泡沫混凝土的养护方式也可被用于分类,包括自然养护、蒸汽养护和蒸压养护等,这些方式可影响泡沫混凝土的密度和强度等性能。总之,泡沫混凝土的多样性使其能够满足各种建筑和工程需求,根据具体项目的要求和环境条件选择合适类型的泡沫混凝土至关重要。水泥基泡沫混凝土是最常见且使用最广泛的类型,通常人们常说的泡沫混凝土就是指这种类型的泡沫混凝土。不同类型的泡沫混凝土都具有各自的特点和适用性。

1.2 泡沫混凝土的特性

1.2.1 轻质

泡沫混凝土以其轻质特性而著称。它的密度相对较低,一般在 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 到 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之间,远低于传统混凝土。泡沫混凝土的轻质特性不仅能够降低建筑物的自重负荷,而且有时还能够显著降低整体结构的总重量。采用泡沫混凝土,一般可使建筑物的总重量减轻约25%左右,在某些情况下,甚至可达到30%~40%的减轻效果。这对于减小地基要求、提高建筑物的抗震性能以及减少建筑物对地基的影响都具有重要意义。因此,泡沫混凝土在建筑工程中不仅有经济效益,还有助于改善整体结构的稳定性。

1.2.2 保温隔热性能好

泡沫混凝土因其独特的结构,包含大量封闭的微小孔隙,具有出色的热工性能,尤其是卓越的保温隔热性能。通常情况下,泡沫混凝土的密度等级在300到 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 之间,其导热系数在 $0.08\sim 0.27\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间。这些微小孔隙由胶凝材料包围,并且相互封闭,使得空气无法

在泡沫混凝土内流通。因此,热量无法通过空气传递,导致泡沫混凝土具有极低的导热率。这种独特的性能使泡沫混凝土能够高效地阻止室内外热能的交换,提高了制冷和制热设备的能量利用效率,同时维持了室内外温度的稳定性。采用泡沫混凝土作为建筑物的墙体和屋顶材料,不仅显著减少了能源消耗,还有助于实现环保和节能的目标。这一特性使泡沫混凝土在建筑工程中具有显著的节能效果,为可持续建筑和环保提供了重要支持。

1.2.3 隔音耐火性能好

泡沫混凝土不仅因其卓越的保温隔热性能而备受瞩目,同时在隔音和耐火性能方面也表现出色。其内部充满了微小的封闭孔隙,这些孔隙具有出色的吸音特性,有效地减少了声波的传播,因此泡沫混凝土具有良好的隔音性能,适用于需要隔音的场合,如住宅和办公室分隔墙、娱乐场所等。此外,泡沫混凝土在高温环境下表现出强大的耐火性能。尽管其表面可能受到高温的影响,但内部的胶凝材料和封闭孔隙结构能够有效减缓热量传播,因此在火灾情况下,泡沫混凝土能够提供一定的阻隔,延缓火势蔓延,为人们的安全和财产安全争取了宝贵的时间。

1.2.4 其他性能

泡沫混凝土不仅以其轻质、保温隔热、隔音和耐火性等显著特性著称,还具备多个其他重要性能。首先,它具备一定的抗震性能,由于其轻质特性,有助于减小建筑物的质量,从而降低地震作用下的振动。其次,泡沫混凝土可以具备良好的耐久性,经过适当的制作和养护,可以长期承受自然环境的影响,包括湿度、温度和化学腐蚀等。此外,泡沫混凝土具有良好的可塑性,易于成型和切割,因此在建筑中具有高度的灵活性,可以满足不同的设计需求。它还具备环保性,通常由可再生材料制成,有助于减少建筑物的能源消耗,符合可持续建筑的原则。最后,泡沫混凝土在一定程度上耐化学腐蚀,能够抵抗某些化学物质的侵蚀,适用于特殊环境下的建筑需求。这些多样化的性能使泡沫混凝土成为一种多功能的建筑材料,适用于各种建筑和工程应用,满足了不同项目的需求和要求。

1.3 泡沫混凝土应用现状分析

泡沫混凝土作为一种先进的建筑材料,已经在国际和国内得到广泛应用,不仅提高了工程质量,还在建筑节能方面发挥了积极作用。以下将对国外和国内的泡沫混凝土应用现状进行分析。

1.3.1 国外泡沫混凝土应用现状分析

泡沫混凝土在国外的应用已经相对成熟,广泛应用于建筑和工程领域:

(1) 建筑隔热和保温材料:泡沫混凝土在国外被广泛用作建筑的隔热和保温材料。其低导热系数和良好的保温性能使其成为节能建筑中的理想选择。在冷地区,泡沫混凝土用于隔热外墙、屋顶和地板,有效地减少了热能损

失。在热带地区,它可以用于保持室内温度,减少冷却负荷。这种应用有助于降低建筑的能源消耗,符合国际能源节约标准。

(2) 地下工程和隧道填充材料:泡沫混凝土被广泛应用于地下工程和隧道的填充和支撑。其轻质特性减轻了地下结构的荷载,同时提供了足够的支撑和稳定性。泡沫混凝土还可以填充地下空间,减少土方工程的成本和施工难度。

(3) 浮筑结构和船坞建设:泡沫混凝土被用于浮筑结构的制造,如浮动码头、浮船坞和浮桥。它的浮力和耐水性使其成为制造这些结构的理想材料。此外,泡沫混凝土可以降低结构的重量,减少材料成本。

(4) 土木工程填充材料:泡沫混凝土常常被用作土木工程中的填充材料,例如填充地基和填充沉降地区。它可以减轻地基压力,提高地基的稳定性,还可以降低填土的重量,减少地基沉降。

(5) 声音隔离和隔音材料:泡沫混凝土在声学应用中也有广泛用途。其多孔的结构能有效吸收声音,用于建筑物内部的隔音墙、天花板和地板,以减少噪音传播。此外,它还可用于工业设备的隔音和隔离。

(6) 轻型混凝土块制造:泡沫混凝土常被用于制造轻型混凝土块,用于建筑物的墙体。这些块具有较低的密度,便于搬运和安装,同时能够提供良好的隔热性能。

总的来说,国外对泡沫混凝土的应用已经相当多元化,它在建筑和工程领域发挥着重要作用,不仅提高了结构性能和能源效益,还降低了施工成本和环境影响。这些成功案例为我国泡沫混凝土的应用提供了有益的经验 and 启示。

1.3.2 国内泡沫混凝土应用现状分析

国内泡沫混凝土的应用现状呈现出多样性和潜力,但相对于国外,发展仍处于起步阶段。

(1) 建筑节能领域:泡沫混凝土在国内建筑节能领域逐渐崭露头角。随着对节能建筑的需求增加,泡沫混凝土作为一种优秀的保温材料,开始广泛用于墙体、屋顶和地板的隔热保温。尤其在北方寒冷地区,泡沫混凝土被用于改善建筑的冬季保温性能,降低供暖能耗。

(2) 地铁与隧道工程:泡沫混凝土在国内地铁和隧道工程中得到广泛应用。其轻质特性减少了工程的自重,提高了地下结构的稳定性,同时也降低了施工成本。泡沫混凝土填充材料还用于地铁车站和隧道的隔音隔热,提供更舒适的环境。

(3) 沉降地区土地开发:在中国的沉降地区,泡沫混凝土被广泛用作填充材料,以解决地基沉降和土壤不稳定的问题。它不仅可以减轻地基荷载,还能够提高土地的可开发性。

(4) 浮筑工程:泡沫混凝土被用于制造浮筑结构,如浮动码头、浮动农田和浮筑油罐。这些结构需要轻质材料来提供浮力,而泡沫混凝土正好满足这一要求。

(5) 声学应用:泡沫混凝土在国内的声学应用也有

所涉及。它被用于音乐厅、录音棚、影院等需要良好隔音性能的场所,以提供高品质的音频环境。

(6) 工业设备支撑:泡沫混凝土被广泛应用于工业设备的支撑和隔离。其轻质性质减轻了设备的重量,同时能够吸收振动和减少噪音,提高了设备的稳定性和安全性。

(7) 生态农业:在农业领域,泡沫混凝土被用于温室和农业大棚的建设,以提供温度和湿度的控制,创造适宜的生长环境。

尽管我国在泡沫混凝土的研发和应用方面相对较晚,但随着对建筑节能和材料性能的需求不断增加,泡沫混凝土在国内的应用逐渐扩大。它在墙体、隔热、隔声、地基等领域都有广泛的应用前景,为建筑工程的质量和节能提供了可行的解决方案。未来随着技术的进步和市场的推动,泡沫混凝土在中国的应用将继续增长。

2 影响泡沫混凝土保温性能影响因素

泡沫混凝土的保温性能受多种因素的综合影响,这些因素对于确保建筑的隔热性能至关重要。首先,泡沫混凝土的密度是其中一个关键因素。一般而言,密度较低的泡沫混凝土具有更出色的保温性能,因为较低密度意味着其中包含更多的微小气孔,这些气孔能有效减缓热量的传导速度。因此,选择合适的密度对于满足建筑的隔热需求非常重要。通常,泡沫混凝土的密度范围在 $300\sim 1000\text{kg/m}^3$ 之间。其次,泡沫混凝土的导热系数是另一个关键因素。导热系数越低,说明泡沫混凝土的保温性能越好,因为低导热系数表明热量传递速度较慢。不同类型和密度的泡沫混凝土具有不同的导热系数,通常在 $0.08\sim 0.27\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间。粒度分布也对保温性能产生影响。细小颗粒的泡沫混凝土通常具有更好的保温性能,因为这些微小颗粒能填充更多的微观空隙,减少热传导。因此,选择具有较小颗粒并且分布均匀的泡沫混凝土可以提高保温效果。另外,防潮性能对泡沫混凝土的保温性能也至关重要。高吸水率可能导致材料吸收水分,降低隔热性能。因此,在高湿度环境中的应用时,需要特别考虑泡沫混凝土的防潮性能。此外,保温层的厚度是影响保温性能的重要因素之一。一般来说,较厚的保温层能够提供更好的隔热效果,因此在建筑设计中需要根据隔热需求来确定泡沫混凝土保温层的厚度。外部环境温度也会对泡沫混凝土的保温性能产生影响。在极端气温条件下,泡沫混凝土需要具备更高的保温性能,以确保室内温度的稳定性。最后,施工质量对泡沫混凝土的保温性能同样具有重要影响。不良的施工工艺可能导致保温层中存在空隙或疏漏,从而降低保温效果。因此,在施工过程中需要严格按照规范进行施工,以确保保温层的连续性和质量。

2.1 泡沫混凝土的原材料及制备方法

2.1.1 组成原料

泡沫混凝土的基本原料为水泥、石灰、水、泡沫,再掺加一些填料、骨料及外加剂。常用的填料及骨料为:砂、

粉煤灰、陶粒、碎石屑、膨胀聚苯乙烯、膨胀珍珠岩。常用的外加剂为发泡剂、稳泡剂等。

(1) 基本原料

泡沫混凝土的基本原料主要包括水泥、粉煤灰和砂。这些原材料在泡沫混凝土的制备过程中扮演着重要的角色：

水泥：水泥是泡沫混凝土的主要胶结材料之一。可以选择不同类型的水泥，如普通硅酸盐水泥、硅酸盐水泥或微膨胀水泥，以满足特定应用的要求。水泥的品种和掺加量会直接影响混凝土的抗压强度。通常情况下，泡沫混凝土宜采用 42.5 级以上标号的水泥，以确保足够的强度。

粉煤灰：粉煤灰在泡沫混凝土中具有多重作用。首先，它可以改善混凝土的流动性，使得混凝土更易于浇筑和成型。其次，粉煤灰具有火山灰效应，可以将不利的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 成分转化为有利的 C-S-H 组分，从而提高混凝土的强度和耐久性。此外，粉煤灰还能改善混凝土的级配和密实性。因此，在泡沫混凝土的制备中，合理选择粉煤灰的比例可以调节混凝土的密度和性能。

砂：砂是泡沫混凝土的骨料之一，主要起到填充作用，有利于提高硬化后泡沫混凝土的体积稳定性。不同粒径和质量的砂对混凝土的性能有直接影响。较大粒径的砂能够提高混凝土的强度，而较细的填充料能使强度密度比更高。

(2) 外加剂

外加剂是为了改善泡沫混凝土的性能而添加的材料。它们包括增塑剂、减水剂和黏结剂：

增塑剂：增塑剂用于提高混凝土的流动性和加工性，使其更易于浇筑和成型。通过增塑剂的使用，可以降低混凝土的黏性，改善工作性，减少外部振捣所需的力量，从而提高生产效率。

减水剂：减水剂的作用是降低混凝土的水灰比，从而提高混凝土的均匀性和强度。减水剂能够减少混凝土中的水含量，同时保持相同的工作性能，这有助于降低混凝土的渗透性，提高抗渗性能。

黏结剂：黏结剂可以增强混凝土的附着力和黏结性，提高了混凝土的耐久性。它们通常用于特殊工程要求，以确保混凝土在恶劣环境下能够保持稳定。

发泡剂，又被称为起泡剂，是一种能够促使泡沫形成以产生封闭或互连气孔结构的物质。在制造泡沫混凝土时，使用的发泡剂通常分为三大类：铝粉类、表面活性剂类和蛋白质类。不同类型的发泡剂会对泡沫混凝土的质量产生重大影响，主要体现在以下方面：浆体的稳定性、气孔及其均匀性、硬化体的力学性能以及抗冻性等。

(3) 发泡剂

在我国，目前广泛使用的发泡剂虽然能够产生大量气泡，但泡沫的稳定性相对较差，这导致泡沫混凝土的强度不高。国内使用的发泡剂主要包括以下几种类型：**松香胶发泡剂：**这种发泡剂通常来源于松香胶，虽然能够生成气泡，但其泡沫相对不够稳定，限制了泡沫混凝土的性能。

废动物毛发发泡剂：这类发泡剂常以废弃的动物毛发为原料，虽然在发泡方面表现出色，但泡沫的稳定性较差。**树脂皂类发泡剂：**这类发泡剂包括一些树脂皂，它们的发泡效果尚可，但同样存在泡沫不够稳定的问题。**水解血胶发泡剂：**水解血胶是一种常见的发泡剂原料，能够生成气泡，但有限的稳定性可能会影响泡沫混凝土的强度和性能。**石油磺酸铝发泡剂：**这类发泡剂通常包含石油磺酸铝化合物，能够生成较多气泡，但泡沫的稳定性有待提高。**木质素磺酸盐和蛋白质水解物：**近年来，一些研究者通过使用木质素磺酸盐和蛋白质水解物等原料，成功合成了具有更好泡沫稳定性的发泡剂。这些发泡剂不仅提高了泡沫混凝土的稳定性，还改善了其性能。

此外，国际上采用蛋白质类发泡剂的例子较多，这些发泡剂具有许多优点，包括快速发泡、细小均匀泡沫、出色的稳定性和持久性。泡沫的膜弹性也对稳定性起到关键作用，它是指泡沫膜在受力后能够自我修复以恢复原始厚度的能力。高膜弹性可以减小外部力量（如重力和毛细管作用）对液膜中液体的影响，从而减缓液膜的液体排放速度，提高泡沫的稳定性。在国外，已经开发出多种创新型泡沫剂产品，例如美国制造的液体发泡剂，它是由烷基磺酸金属盐和水解蛋白质混合而成的。日本也研发了蛋白质物质与适量阳离子表面活性剂混合而成的混合发泡剂。这些创新的发泡剂有望在泡沫混凝土的生产中提高泡沫的品质和性能，为建筑行业提供更多高性能的节能材料。

(4) 稳泡剂

稳泡剂的作用是为了控制泡沫的稳定性和维持其气泡结构，以防止泡沫的破裂和融合。稳泡剂有助于确保泡沫混凝土具有所需的孔隙结构和保温性能。

稳泡剂的选择需要根据具体的发泡剂和混凝土的配方来确定。一些常见的稳泡剂包括有机稳泡剂和硅酮稳泡剂。这些稳泡剂能够包裹气泡，防止其融合和破裂，从而保持泡沫的稳定性。

2.1.2 生产工艺

泡沫混凝土的生产工艺通常包括以下关键步骤。首先，需要测量并准确混合水泥、掺合料、集料、复合外加剂以及水等原材料。接下来，将制备好的泡沫溶液逐渐添加到混合物中，继续搅拌以确保混合物均匀混合。随后，将混合物倒入模具中，通过轻微的振动以实现密实，然后进行预养护。最后，脱模并进行必要的养护，以获得最终的泡沫混凝土成品。

目前，有三种主要的发泡工艺方法：

水溶法发泡工艺：这一方法涉及将发泡剂溶解在水中，然后将其与水泥混合以引发发泡反应。然而，这种方法需要大量的发泡剂，成本较高，并且可能导致泡沫的尺寸不均匀。通常只适用于需要微量引气的混凝土。

高速搅拌法发泡工艺：这一方法使用高速搅拌机来激烈搅拌预制泡沫，然后将其与水泥浆体混合。然而，这种方法

的泡沫容易破灭，如果未用完，预制的泡沫可能会被浪费。

压缩空气法发泡工艺：这一方法使用压缩空气来制造泡沫。在将含有发泡剂的水泥浆体搅拌的同时，通过压缩空气机将空气注入，从而使浆体发生发泡。相对于前两种方法，压缩空气法的设备可能复杂一些，但发泡效率高，产生的泡沫尺寸均匀，减少了中间环节，还可以根据需要确定发泡量，避免了泡沫过剩的问题。

选择适当的发泡工艺方法通常取决于具体的生产需求和要求，以及对泡沫混凝土性能的期望。

制备泡沫混凝土的流程下图所示：

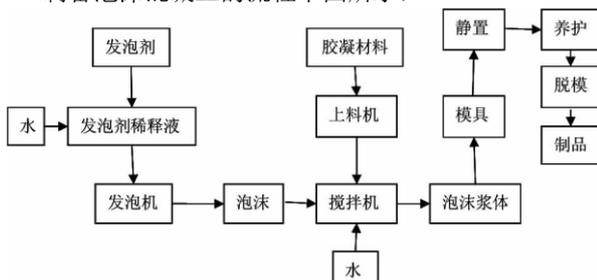


图1 制备泡沫混凝土的流程

2.2 原材料的影响

2.2.1 水泥-砂浆泡沫混凝土的性能

首先，我们将研究未添加混合材料的水泥砂浆泡沫混凝土，即由水泥、砂子和泡沫三个组分构成的泡沫混凝土。我们将保持泡沫混凝土中单位体积的水泥用量不变，固定为 $40\text{kg}/\text{m}^3$ ，而主要调整的参数是水灰比。需要注意的是，由于体系中各参数之间存在相互影响，我们不仅会改变水灰比，还会引起其他参数的一定程度变化。在这项研究中，我们主要关注泡沫混凝土的硬化性能，包括抗压强度和导热系数。

(1) 水灰比与水泥-砂浆泡沫混凝土导热系数、抗压强度的关系

泡沫混凝土的试样配合比如表1所示。在试样制备过程中，我们将控制新拌泡沫混凝土的设计密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。水灰比是一个关键参数，它代表着水和水泥的比例。通过改变水灰比，我们可以研究其对泡沫混凝土性能的影响，主要关注抗压强度和导热系数这两个性能指标。

表1 水泥-砂浆泡沫混凝土试样原料配合比

水泥/ kg/m^3	砂子/ kg/m^3	水/ kg/m^3	泡沫/ m^3/m^3	W/C
400.00	380.00	220.00	0.55	0.55
400.00	360.00	240.00	0.53	0.60
400.00	340.00	260.00	0.52	0.65
400.00	320.00	280.00	0.51	0.70
400.00	300.00	300.00	0.49	0.75
400.00	280.00	320.00	0.48	0.80

制成的泡沫混凝土按条件和试验方法养护至预定龄期，测定密度、抗压强度和导热系数，结果列于表2。

表2 水泥-砂泡沫混凝土物理性能

干燥密度/ kg/m^3	导热系数/ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	抗压强度/ MPa		
		7d	14d	28d
840	0.29	1.30	1.50	1.90
820	0.28	1.50	1.70	1.90
810	0.27	1.70	1.90	2.00
810	0.28	1.80	2.30	2.70
810	0.28	2.20	2.50	2.90
840	0.29	2.50	2.80	3.10

由表2可知，当泡沫混凝土的干燥密度相近时其导热性能变化不大，但是，强度表现出一定程度的波动。

(2) 水泥-砂浆泡沫混凝土密度与强度、导热性能的关系

所用泡沫混凝土试样的配合比列于表3。

表3 不同密度的泡沫混凝土原料配比

混凝土设计密度/ kg/m^3	水泥/ kg/m^3	砂子/ kg/m^3	水/ kg/m^3	泡沫/ m^3/m^3
1600	400.00	920.00	280.00	0.26
1400	400.00	720.00	280.00	0.35
1200	400.00	520.00	280.00	0.43
1000	400.00	320.00	280.00	0.51
850	400.00	120.00	280.00	0.59
620	350.00	0.00	250.00	0.69

制成的泡沫混凝土试样，按条件和试验方法养护至预定龄期。测定泡沫混凝土不同密度与抗压强度和导热系数的关系，结果见图1、图2所示。

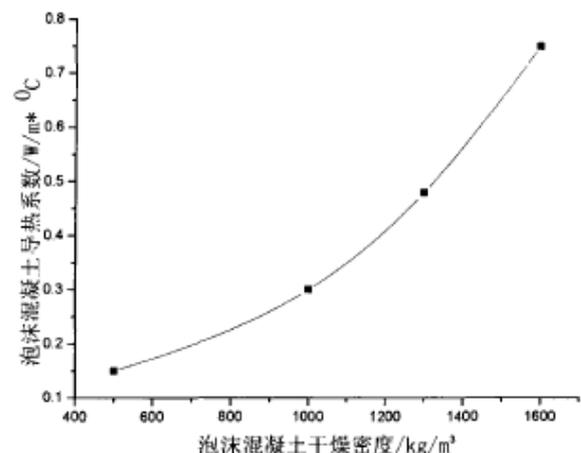


图2 泡沫混凝土的导热系数与干燥密度的关系

由图1可以清楚地看出，泡沫混凝土的导热系数随其干燥密度的降低而减小，并且较好地服从指数变化规律即

$$Y=0.0872e0.0014x \quad (1)$$

式中：X-泡沫混凝土的干燥密度， kg/m^3 ；

Y-泡沫混凝土的导热系数， $\text{w}/\text{m}\cdot\text{k}$ 。

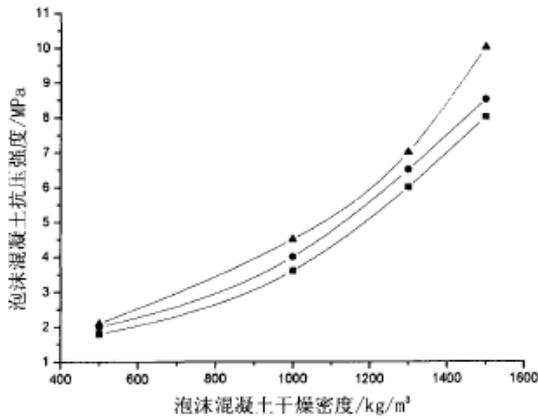


图3 泡沫混凝土的抗压强度与干燥密度的关系

当泡沫混凝土的干燥密度从 $1500\text{kg}/\text{m}^3$ 降低到 $430\text{kg}/\text{m}^3$ 时, 其导热系数也显著降低, 从 $0.70\text{w}/\text{m}\cdot\text{k}$ 降低到 $0.16\text{w}/\text{m}\cdot\text{k}$ 。相比之下, 普通水泥混凝土的导热系数通常约为 $1.7\text{w}/\text{m}\cdot\text{k}$ 左右。这个差异表明, 通过降低混凝土的密度, 可以明显减小其导热系数, 从而赋予其良好的隔热和保温性能。

这种独特的隔热性能源于泡沫混凝土内部引入的泡沫结构。这些细小而均匀分布的气泡阻碍或减缓了热量传导, 因此导致了泡沫混凝土导热系数的降低。具体来说, 对于给定的泡沫混凝土, 其干燥密度 X (表示材料的紧密程度) 与孔隙率 P (表示材料中的气孔数量和分布) 之间存在以下关系:

$$X = X_0(1 - \rho) \quad (2)$$

式中: ρ - 泡沫混凝土的孔隙率, 用体积分数表示;

X_0 - 孔隙率为 ρ 时假想泡沫混凝土的密度。

这样式 (1) 所示的导热系数与干燥密度之间的关系也可以表示为下式 (3) 所示的导热系数与孔隙率之间的关系, 即:

$$Y = 0.0872e^{0.0014x} \cdot (1 - \rho) \quad (3)$$

显然, 泡沫混凝土孔隙率的增大是导致其导热系数减小的根本原因。然而, 与导热系数的减小相伴随的是泡沫混凝土的抗压强度随着干燥密度的降低而减小。因此, 在实际应用中, 确定适宜的泡沫混凝土配合比需要综合考虑工程对密度、抗压强度、导热系数等性能的要求。

从这个角度来看, 泡沫混凝土并不是一个固定的产品, 而是一个系列产品, 因为可以通过调整配合比来满足不同工程项目的特定需求。在工程应用中, 需要权衡各种性能指标, 以找到最合适的配合比, 以便在轻量化、保温、抗压强度等方面实现最佳性能。

这种灵活性使泡沫混凝土成为一种多功能的建筑材料, 适用于各种不同的应用领域, 包括建筑、绝缘、隔热等, 为工程师和设计师提供了更多的选择和解决方案。

2.2.2 水泥-混合材-砂浆泡沫混凝土的性能

水泥-砂浆泡沫混凝土的性能可以通过掺入粉煤灰、矿渣、硅灰等混合材来改善, 这不仅可以有效利用工业废

渣, 还可以提升泡沫混凝土的各种物理力学性能。

在之前的水泥-砂浆泡沫混凝土试验基础上, 进行了掺入粉煤灰、矿渣以及适量硅灰的泡沫混凝土性能研究, 即水泥-混合材-砂浆泡沫混凝土的性能变化规律。下表列出了用于试验的泡沫混凝土试样的配比情况。试验所用泡沫混凝土试样的配合比列于表 4。与前述表 1 和表 3 所列泡沫混凝土的配合比不同之处是, 表 4 所示泡沫混凝土中均添加有剂量不等的超塑化剂。

制成的泡沫混凝土按上述条件和试验方法养护至预定龄期, 测定密度、抗压强度和导热系数, 结果列于表 5。

表4 水泥-混合材-砂浆泡沫混凝土的原料配比

混凝土密度/ kg/m^3	水泥/ kg/m^3	砂子/ kg/m^3	硅灰/ kg/m^3	矿渣/ kg/m^3	粉煤灰/ kg/m^3	水/ kg/m^3	泡沫/ m^3/m^3
820	390	-	46.50	87.20	58.20	174	0.63
1050	290	427	34.20	64.10	42.70	132	0.54
1280	650	-	77.70	146	97.10	291	0.37
1610	460	684	54.70	103	68.40	21	0.30

表5 水泥-混合材-砂浆泡沫混凝土硬化体性能

干燥密度/ kg/m^3	导热系数/ $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$	抗压强度/ MPa		
		7d	14d	28d
710	0.24	4.50	5.50	6.60
960	0.33	2.60	3.60	4.20
1160	0.44	13.20	15.70	17.00
1520	0.74	19.30	20.40	23.70

掺入混合材后, 由于比表面积扩大, 浆体的流动性会降低, 因此需要添加适量的减水剂以确保在较低的水灰比下能够进行成型。尽管浆体流动性降低, 但由于超塑化剂的加入有助于保持原始砂浆的流动性, 也有利于泡沫的分散。

硬化后的泡沫混凝土的导热系数仍然随着干燥密度的变化而按指数关系减小, 这是因为泡沫混凝土的导热系数主要受其孔隙率的影响。密度较低时, 泡沫混凝土的孔隙率较高, 从而导致导热系数较低, 具有更好的隔热保温性能。此体系中, 由于水灰比被控制在较低水平, 而超塑化剂的添加保持了原始砂浆的流动性, 有利于泡沫的均匀分散。这使得泡沫混凝土的抗压强度显著提高, 相比之前的水泥-砂浆泡沫混凝土, 相同养护时间和相近密度条件下, 抗压强度提高了 2~3 倍。

总之, 通过改变泡沫混凝土的配合比和外加剂的添加量, 即使在相同的密度下, 也可以在较大范围内调整其抗压强度, 而导热系数的变化相对较小。这表明泡沫混凝土是一个具有可调性能的材料, 可以根据具体工程需求进行合理的调配。

2.3 工艺制度的影响

2.3.1 泡沫混凝土的气孔形成过程

泡沫混凝土的制备过程可分为两个重要阶段: 泡沫的

生成和气孔的形成。

首先,在泡沫混凝土的制备中,发泡剂(FP)发挥关键作用。发泡剂会在泡沫混凝土的浆体中发生化学反应,释放大量的气体,这些气体均匀分布在浆体中。这个过程通常被称为泡沫混凝土料浆的浇筑前期。在此阶段,气体被均匀地分散在浆体中。

接着,在泡沫混凝土的浇筑后期,混凝土中的胶凝成分开始水化,坯体开始硬化,获得一定硬度。在这个过程中,大量的气体被固定在坯体内部,最终形成了大量的气孔。这个阶段被称为泡沫混凝土的成型期。

2.3.2 泡沫混凝土的气孔结构特征

对于已经硬化的超轻泡沫混凝土,在剖开后的观察中,可以看到它实际上由无数大小不一的气孔和气孔壁组成的复合体。在显微镜下观察,气孔壁主要由硅质材料微粒和未完全水化的水泥粒子组成。这些硅质材料颗粒之间形成了一个坚固的骨架,其中包含了各种微小孔隙和缝隙,形成了不均匀的固-液-气三相结构。这个结构在气孔壁中起到了关键作用,使其能够承受外部应力。

气孔壁结构中的各种材料和物质之间不仅存在直接接触或机械啮合,还存在化学反应产物的结合。这种结合使得气孔壁具有较高的强度,能够承受外力的作用。

2.3.3 泡沫混凝土内部气孔的技术要求

泡沫混凝土内部的气孔结构对其性能具有重要影响,因此有一些技术要求必须满足,以确保泡沫混凝土能够达到所需的性能标准。以下是泡沫混凝土内部气孔的技术要求:

封闭性气孔:气孔必须是封闭的,而不是相互连接的。封闭性气孔可以减小热传导,提高泡沫混凝土的保温性能。这对于泡沫混凝土作为保温材料至关重要。

均匀分布:气孔应当均匀分布在泡沫混凝土内部,而不是集中在特定区域。均匀分布的气孔有助于提高泡沫混凝土的抗压强度,并确保性能均匀性。

控制气孔尺寸:气孔的尺寸应受到控制,以满足特定的工程需求。较小的气孔有助于提高抗压强度和保温性能,而较大的气孔可能会减弱这些性能。

密度控制:泡沫混凝土的密度应该在一定范围内控制,以满足工程设计的要求。不同密度等级的泡沫混凝土适用于不同的应用领域。

强度保证:气孔壁必须足够坚固,能够承受外部应力。这涉及到气孔壁中的硅质材料微粒和水泥粒子的化学反应,以形成坚硬的结构。

控制孔隙率:泡沫混凝土的孔隙率需要在合适的范围内控制,以满足工程性能要求。孔隙率与密度直接相关,对泡沫混凝土的保温性能、抗压强度等性能产生重要影响。

2.3.4 气孔结构与泡沫混凝土性能的关系

泡沫混凝土制品的密度和孔隙率密切相关。通常情况下,密度等级为05的泡沫混凝土其孔隙率在80%~90%之间;密度等级为06的泡沫混凝土孔隙率范围为72%~85%;

密度等级为07的泡沫混凝土孔隙率仅为65%~72%。气孔的存在不仅影响了泡沫混凝土的密度,还影响了其强度、保温性能、抗冻性等多种性能。

研究表明,当气孔的直径较小(小于2mm)且均匀分布在泡沫混凝土内部时,泡沫混凝土具有较高的抗压强度,能够承受使用条件下的荷载,并具备良好的保温和隔热性能。然而,如果气孔直径较大且分布不均匀,制品在外力作用下容易发生应力集中,导致抗压强度降低。因此,泡沫混凝土的气孔结构直接影响其性能。为了获得满足特定工程需求的泡沫混凝土制品,需要合理控制气孔的尺寸、分布和密度,以满足工程性能要求。

2.4 养护制度的影响

养护制度对泡沫混凝土的性能和最终品质有着显著的影响,特别是在早期养护阶段。泡沫混凝土的水泥基凝固体具有较高的水灰比,因此,在成型后需要特别注意早期养护和保水措施,以确保其性能的充分发挥和长期稳定性。

首先,早期养护对于泡沫混凝土的强度发挥至关重要。在成型后的最初几天,水泥和其他胶凝材料仍在水化硬化的过程中,形成坚实的胶凝体结构。在这个关键的水化硬化阶段,充足的水分是必不可少的,因为它促进了水泥颗粒之间的反应,增强了混凝土的内聚力。如果水分过早散失,可能会导致水泥水化不充分,从而影响混凝土的强度和密度。因此,早期养护应包括定期的湿润,以确保混凝土表面不过于迅速失去水分。

其次,早期养护也对泡沫混凝土的保温性能具有关键性影响。泡沫混凝土的保温性能依赖于其孔隙结构,而养护过程中的水分管理直接影响着这种结构的形成。如果在早期养护中水分散失过快,可能导致气孔内部的空气被排出,从而减弱了保温效果。因此,保水养护是确保泡沫混凝土保温性能的关键步骤。这可以通过覆盖湿润的毛巾、塑料薄膜或喷洒水来实现,以维持混凝土表面的湿度。

另外,养护温度也是需要考量的因素。温度对水泥水化反应的速率有重要影响,过低的温度可能会减缓水化反应,因此,应确保在适宜的温度范围内进行养护,以促进水化硬化的进行。

总之,养护制度对泡沫混凝土的质量和性能至关重要。通过合理的早期养护和保水措施,可以确保泡沫混凝土达到设计要求的强度和保温性能,从而满足工程应用的需要。养护方案应根据具体的工程条件和气候环境来制定,以最大程度地发挥泡沫混凝土的性能潜力。

3 结束语

3.1 我国在泡沫混凝土应用方面的问题

3.1.1 在理论方面存在的不足

在泡沫混凝土领域,我国在理论研究方面存在一系列的不足之处。首先,泡沫混凝土的研究相对较新,尚未形成完善的理论体系。与传统混凝土相比,泡沫混凝土的材料构成和性能特点更为复杂,但目前公开发表的文献和研

究成果相对有限。这导致了泡沫混凝土的相关理论知识相对匮乏,缺乏系统性和深度。其次,国内外关于泡沫混凝土的性能研究多以专利形式出现,而很少有公开发表的文献报道。这种情况导致了泡沫混凝土领域的研究资料有限,难以为广大研究人员提供参考和借鉴的依据。另外,尽管泡沫混凝土已经在一些工程中得到应用,但缺乏全面的性能研究。目前的研究主要集中在泡沫混凝土的制备工艺和应用案例上,而对于其力学性能、导热性能、隔热性能等关键性能指标的深入研究尚不足够。这使得泡沫混凝土的性能优化和工程应用受到了限制。最后,国内至今还没有建立一套完善的泡沫混凝土规范,缺乏一套权威的技术标准来规范泡沫混凝土的生产和应用。这导致了泡沫混凝土的施工缺乏理论指导,存在着规范性不足的问题。我国在泡沫混凝土领域的理论研究存在不足,需要加大研究力度,建立完善的理论体系,开展更深入的性能研究,制定相关的技术规范,以推动泡沫混凝土在建筑领域的发展和应用。

3.1.2 在实际工程中存在的问题

在实际工程应用中,泡沫混凝土面临着一系列显著问题,这些问题限制了其广泛应用和进一步发展。首先,泡沫混凝土的制备技术在国内仍相对不够成熟,缺乏成套的生产设备和规范的工艺流程,这导致了生产效率低下和质量控制难度增加。因此,急需更多的研究和技术创新,以提高泡沫混凝土的生产技术水平。其次,一些泡沫混凝土产品存在抗压强度相对较低的问题,尤其是低密度泡沫混凝土。这限制了其在需要承受较大荷载的工程项目中的应用,如结构支撑等。因此,提高泡沫混凝土的抗压强度成为亟待解决的问题之一。此外,为了提高泡沫混凝土的强度,通常需要采用大掺量和高强度的水泥,然而,这也增加了泡沫混凝土表面出现开裂的风险。开裂不仅影响外观美观,还可能导致水分的渗透,从而降低保温性能。另一个问题是泡沫混凝土的吸水率较高,且存水率也大,这在某些工程应用中可能会引发问题,特别是在长期高湿度或水分环境下,可能导致泡沫混凝土的性能下降。最后,由于在制备过程中引入了大量气泡并使用粉料和细颗粒作为原料,泡沫混凝土容易出现较高的收缩率,这可能导致在应用中出现尺寸不稳定的问题。尽管泡沫混凝土具有轻质、隔热、隔音等多项优点,但在实际工程应用中,上述问题仍然需要克服。通过不断的技术改进、制定规范以及深入的研究,可以逐步解决这些问题,推动泡沫混凝土在建筑和工程领域的更广泛应用。

3.2 展望

展望未来,泡沫混凝土作为一种具有广泛潜力的建筑材料,面临着巨大的发展机遇。以下是对泡沫混凝土未来发展的一些展望:泡沫混凝土在节能和环保方面具有显著优势,能够满足社会对可持续建筑材料的需求。随着全球对环境问题的关注不断增加,泡沫混凝土将成为建筑业绿色施工的主要选择之一。未来,我们可以期待更多的绿色建筑项目采用泡沫混凝土,以减少能源消耗和碳排放。泡

沫混凝土的研究和开发还有很大的潜力。未来的研究可以集中在改进生产工艺、开发新型发泡剂、寻找替代原材料、提高抗压强度、降低吸水率等方面。这些技术创新将有助于提高泡沫混凝土的性能和品质,拓展其应用领域。泡沫混凝土的应用领域也将继续扩大。除了目前广泛应用于保温材料的建筑外,未来还可以将泡沫混凝土应用于更多领域,如道路工程、地下工程、船舶制造、太阳能反射板、冷藏仓库等。这将有助于泡沫混凝土在不同领域实现更广泛的应用。泡沫混凝土的性能研究也将取得更多进展。通过深入研究泡沫混凝土的绝热机理、气孔结构以及导热系数等关键性能,可以为其在设计和工程应用中提供更多的理论依据。建立更精确的模型来预测泡沫混凝土的性能,将有助于优化其配方和工程设计。总的来说,泡沫混凝土作为一种具有潜力的建筑材料,未来将继续受到广泛关注和研究。随着技术的不断进步和应用领域的扩大,泡沫混凝土有望在建筑和工程领域发挥更重要的作用,为可持续建设和环保发展做出贡献。

【参考文献】

- [1]李素珠,莫定聪,郑智敏,等.聚丙烯泡沫混凝土抗盐侵蚀性能[J].建材世界,2023,44(4):38-41.
- [2]陈国权.粉煤灰复合膨胀珍珠岩对泡沫混凝土性能影响研究[J].福建建设科技,2023(5):59-62.
- [3]颜庆智,耿锦川,刘晓辉.泡沫混凝土在地面轻质垫层中的应用[J].新技术新工艺,2015(11):110-113.
- [4]刘政,黄志炜,丁国龙.淤泥质土层大基础泡沫混凝土垫层施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2023(27):115-117.
- [5]吴小流.轻质泡沫混凝土在高陡填方路基中的应用研究[J].西部交通科技,2022(10):91-92+153.
- [6]谢洪阳,戴宜文,任宇航,等.多因素及干湿循环对泡沫混凝土性能的影响[J].中国粉体技术,2023,29(5):125-134.
- [7]李建林,张智强,余林文.低密度碱矿渣发泡混凝土的制备及基本力学性能[J].硅酸盐通报,2023,42(1):76-84.
- [8]闫秋会,秦周浩,刘倩,等.高性能混凝土发泡剂的制备方法研究[J].硅酸盐通报,2019,38(1):270-275.
- [9]李凌峰,李建林,张智强.稳泡剂对低密度碱矿渣泡沫混凝土基本性能的影响[J].新型建筑材料,2023,50(8):139-144.
- [10]廖师贤,黄蕾.基于浆体取代法再生砖粉泡沫混凝土试验研究[J].中外公路,2023,43(4):256-260.
- [11]李永靖,王松,张淑坤,等.新型泡沫混凝土缓冲层对深埋软岩隧道卸压规律的影响[J].安全与环境工程,2023,30(5):54-65.

作者简介:郭峰(1988.7—),单位名称:泰州市同一建设工程有限公司;毕业学校和专业:重庆大学土木工程。