

泡沫混凝土微观结构对宏观性能的影响机理

王丽娟, 陈 缘, 杜高翔

(中国地质大学(北京)材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:针对当前阻碍泡沫混凝土广泛应用的主要因素,即对泡沫混凝土性能的基本认知不足且技术研究尚不充分,综述泡沫混凝土在混凝土拌合至初凝、硬化过程和使用过程 3 个阶段中微观结构的形成及劣化机理,介绍泡沫混凝土微观结构与宏观性能之间的理论模型和模型的适用范围,证实泡沫混凝土的微观结构对自重、导热、机械强度、渗透等宏观性能的影响;从胶凝材料、集料、矿物混合材、发泡剂、外加剂、配合比以及材料制备工艺等角度分析影响泡沫混凝土微观结构的因素,探讨微观结构控制的机理和可行性,指出未来的研究方向是在当前研究的基础上对泡沫混凝土的制备条件和工艺参数控制进行进一步改进和探索。

关键词:泡沫混凝土;微观结构;性能

中图分类号: TU528.2, TU528.31, TU528.58 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2015)05-0063-06

Influence Mechanism of Microstructure of Foam Concrete on Macroscopic Properties

WANG Lijuan, CHEN Yuan, DU Gaoxiang

(School of Material Science and Technology,

China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the main factors hindering extensive use of foam concrete including being lack of insufficient basic concept of properties of foam concrete and technology research, the microstructure transformation and deterioration mechanism of foam concrete during the processes of mixing-to-initial-setting, hardening and application were summarized. The application range of the theoretical model of microstructure and properties of foam concrete were introduced. The effect of microstructure on properties such as self-weight, heat conduction, mechanical strength and infiltration were proved. The factors influencing microstructure of foam concrete were analyzed from the viewpoint of cementitious materials, aggregates, mineral mixtures, additives, mixing ratio and preparation technology. The mechanism and feasibility of microstructure preparation were discussed. The future research emphasis was pointed to be further improving and exploring preparation conditions and process parameters

收稿日期: 2014-10-20, 修回日期: 2014-11-03。

基金项目: 中国地质大学(北京)基本科研业务费专项资金项目, 编号: 2011YYL155。

第一作者简介: 王丽娟(1979—), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向为矿物材料。E-mail: wljcl@cugb.edu.cn。

通信作者简介: 杜高翔(1976—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为矿物材料和建筑材料。E-mail: dgx@cugb.edu.cn。

control of foam concrete on the basis of current research.

Keywords: foam concrete; microstructure; property

泡沫混凝土是一种将泡沫剂水溶液以高压空气或机械搅拌等方式制成泡沫,再使泡沫与胶凝材料浆料搅拌混合,经浇注成型并加以自然养护或蒸汽养护而成的微孔轻质材料^[1]。由于国家“十二五”规划中节能减排力度持续加大,因此具有轻质保温、节能环保等特点的泡沫混凝土,在工程中的应用范围越来越广,使用量也在不断增大。研究表明,由于泡沫混凝土具有普通混凝土所没有的特殊性能,因此不仅可用于墙体保温,还可用作防火材料、抗震材料、吸声材料、防水材料等^[2-4]。受泡沫混凝土起步较晚的制约,当前泡沫混凝土广泛应用的主要阻碍因素是人们对其性能基本认知不足,技术研究尚不充分。本文将泡沫混凝土的微观结构和宏观性能相联系,对泡沫混凝土的生产技术控制进行研究。

1 泡沫混凝土微观结构的形成以及劣化过程

从剖面观察,泡沫混凝土可以看作无数大小不一的气孔和气孔壁构成的复合体,复合体的分布、大小和形状决定了泡沫混凝土的性能^[5]。泡沫随着料浆的硬化过程被固定在混凝土内部;各种水化产物、未反应的物料微粒和壁内空隙组成孔间壁,形成水化硅酸盐为骨架并且各类结晶体、微小孔隙等分布其中的不均质堆聚结构。泡沫混凝土按孔径尺寸分为 3 类,即微孔混凝土(孔径小于 1 mm)、中孔混凝土(孔径为 1~3 mm)、大孔混凝土(孔径大于 3 mm)^[1]。虽然影响泡沫混凝土微观结构的因素多样,但是仍可以从材料的制备过程到使用阶段,对材料微观结构的形成、演化以及在进程中产生重要影响的因素进行分析。

1.1 混凝土拌合至初凝

1.1.1 微观结构变化

气-液两相体系的泡沫进入料浆形成气-液-固三相体系,最终向气-固两相体系过渡的过程被称为泡沫混凝土的形成过程。最初液膜包围气体成为泡沫,

当泡沫散布于料浆中就形成了气-液-固三相体系。在此过程中,气泡从单纯液膜变为液-固复合膜,泡沫的机械强度以液膜为主,同时在挤压力变大的影响下,泡沫形状逐渐改变。随后,三相体系过渡转变为气-固两相体系,即浆体成型至初凝阶段。在这一过程中,泡沫强度为复合强度,除了泡沫的液膜机械强度支撑以外,胶凝组分颗粒发生水化反应也逐渐产生强度,此时占据主导地位的仍为液膜强度。在形成过程中,泡沫混凝土微观结构的劣化现象主要有泌水现象、离子富集、絮凝现象、塌落现象,下面逐一进行机理分析。

1.1.2 泌水现象

混凝土拌合物在浇筑后至初凝阶段呈塑性和半流动态,由于水、胶凝材料颗粒与集料之间密度不同,受重力影响,容易在这一阶段发生相对运动,因此出现内分层现象^[6]。大颗粒的集料在沉降过程中易在下方形成水囊,使局部水灰质量比(简称水灰比)变大,颗粒下方孔隙率更大,未水化水泥颗粒含量更小。大尺寸集料颗粒下方的内分层现象使得集料-浆体间的粘结力减小,致使集料下方区域更加薄弱,这对混凝土的强度和耐久性都有很大影响^[7]。混合料料浆的和易性受材料配合比、胶凝材料与集料的级配、集料粒形、用水量和外加剂掺量等因素影响,和易性较差的料浆致使水分向混合料下部,甚至材料的整体表面迁移。

1.1.3 离子富集

胶凝材料的水化过程中,不同组分颗粒的溶解度与离子迁移速度随水化进程发生变化且相互之间差异较大。通常,含硅组分会快速以水化产物形式沉积,同时大部分 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和部分 Al^{3+} 将进入溶液,在集料周围进行沉积生长。集料附近离子的迁移以及水化产物的结晶也受微区泌水的影响,局部水灰比的增大为 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 及 Al^{3+} 等离子的迁移提供了条件,使得氢氧化钙和钙矾石在界面区大量富集,界面区强度变得更加薄弱。这也很好地解释了不同尺寸的集料微区泌水对材料性能产生差异影响^[8]。

1.1.4 絮凝现象

当胶凝材料颗粒小于一定值时,拌合过程中受表面能的影响,颗粒更容易絮凝成团。Diamond^[9]的研究证明了这类絮凝团直径可达数百微米,导致胶凝材料在集料表面的堆积密度减小,孔隙率增大。集料的尺寸与孔隙度成正比,Elsharief 等^[10]的研究表明,随着集料尺寸的减小,孔隙度减小。

1.1.5 塌落现象

由于大多数材料塌模发生在拌合至初凝阶段,因此可以认为浆体成型至初凝期间是控制泡沫混凝土质量的最关键阶段。泡沫尺寸越不均匀,水灰比越大,越容易造成泡孔的大范围破灭,产生浆体的局部或全

部下陷。材料在这一阶段维持形态的关键如下:1)减小泡沫泡径分布;2)控制合适的气泡膜层厚度,理想状态是建立一定厚度的平衡膜;3)加快料浆凝结速度,使料浆在泡沫连锁式破灭前凝结硬化^[11]。

1.2 材料硬化过程

1.2.1 微观结构变化

在材料硬化阶段,胶凝物料初凝后,水化的进程开始加快,泡沫发生实质性变化。水化作用产生的大量热量逐渐蒸发了泡沫液膜的水分,泡沫最终转变成只有气-固界面的气孔,原来在液膜上附着的水化物变为包围气体的胶凝壁层,即泡沫混凝土硬化过程^[12]。材料的微观结构在这一阶段的劣化现象主要有自生体积变形、干燥收缩变形、膨胀系数差异引起的微观结构劣化等,下面逐一进行机理分析。

1.2.2 自生体积变形

恒温密封条件下,在胶凝材料水化过程中,泡沫混凝土内部的物理化学反应会引起胶凝材料的体积减小,形成化学收缩。在此过程中,泡沫混凝土内部相对湿度出现减小的现象,称为自干燥作用。自干燥会在体系内部孔隙中形成饱和蒸气压,孔隙中的水因形成弯液面而产生拉应力,继而引起泡沫混凝土的自生收缩。泡沫混凝土的自生收缩主要受水灰比的影响,随着水灰比的减小,自生收缩会增大,当泡沫混凝土的水灰比为 0.4 时,自收缩体积约占总收缩体积的 25%,已不可忽略^[13-15]。

1.2.3 干燥收缩变形

置于不饱和空气中的混凝土因水分失散而引起的体积变形,称为干燥收缩变形^[16-17]。干燥收缩变形是引起泡沫混凝土开裂的最主要原因之一。严格来说,干燥收缩应为泡沫混凝土在干燥条件下实测的变形扣除相同温度下的自生体积变形^[18-19]。影响泡沫混凝土干燥收缩变形的因素很多,包括水泥品种及用量、集料含量、水灰比、周围环境的湿度、温度及颗粒尺寸等。在泡沫混凝土中掺加高细度的集料可有效地减少混凝土的收缩,但是掺入量过大会使强度下降;根据经典水化理论,水泥完全水化的水灰比为 0.38,而在不加减水剂的情况下,生产泡沫混凝土的水灰比高达 0.7~0.8。由此可知,如果不加入减水剂对水灰比进行适当调节,泡沫混凝土的干缩情况将十分严重^[20]。研究表明,当水泥用量不变时,水灰比与干缩为正向对应关系,材料基体内部在收缩应变超过临界值时会产生微裂纹,破坏材料强度^[21]。

1.2.4 膨胀系数差异引起的微观结构劣化

胶凝材料的水化过程是放热过程,集料和浆体在水化过程中会按照各自的膨胀系数进行膨胀和收缩。在这 2 个阶段中,当邻近浆体与集料的变形差异未达

到临界值时,材料内部保持整体性,并无明显缺陷形成,耐久性较好;但是当浆体与集料的变形差异超过临界值后,二者间可能发生集料周围浆体开裂或局部脱粘现象,材料耐久性较差。由此可知,选择膨胀系数相匹配的集料和浆体可以有效提升材料强度。

1.3 材料使用过程

根据所处使用环境的不同,泡沫混凝土微观结构在材料使用过程中的劣化机理也不尽相同,由于泡沫混凝土一般不应用于载荷,因此耐久性是其性能的重要指标,而众多影响因素中碱集料反应和环境引起的微观结构变化对耐久性的影响最大。

1.3.1 碱集料反应

碱集料反应(AAR)即混凝土微孔中主要来源于水泥熟料和外加剂的碱溶液与集料中活性矿物之间发生的化学反应,反应生成膨胀物质或吸水膨胀物质,引起混凝土产生自膨胀应力形成开裂破坏的现象^[22-23]。一般而言,碱集料反应对泡沫混凝土强度的破坏相对缓慢,但是这种在集料周围产生微裂纹的反应所造成的破坏难以阻止且不可逆,极难修补和挽救。

1.3.2 环境的侵蚀破坏

水蒸气、水及其他侵蚀性介质可以由外部环境通过孔隙和裂纹扩散进入材料内部,对材料进行多种物理化学破坏,引起其微观结构劣化。在我国寒冷的北方地区,水对泡沫混凝土的主要破坏方式是冻融循环破坏。泡沫混凝土中气孔孔径大,其中充斥着自由水或吸附水,除了会发生如同普通混凝土的毛细孔内的水结冰膨胀破坏外,在饱和的表面和不饱和的内部之间的差动力也能够破坏泡沫混凝土的微观结构^[24]。Tikal'skya 等^[25]发现,随着泡沫混凝土密度减小,即大孔增多,材料的抗冻融循环能力反而增强。由于气孔为水转化成冰所带来的体积膨胀提供缓冲空间,因此如果水未能在结冰前充满孔隙,冻融循环的破坏效果甚至可以忽略;水在温暖地区主要作为侵蚀性介质的载体使其进入材料内部与水化产物进行反应,或生成膨胀产物钙矾石产生膨胀破坏,或导致水化产物中易于溶出的组分溶出,或在干湿循环的作用下,参与结晶膨胀等方式破坏材料微观结构^[26]。

对上述劣化现象进行分析可以得出,泡沫混凝土微观结构的形成与演化是各种相关因素共同作用的结果,只是受条件变化的影响,材料微观结构劣化的各种因素重要性有所变化。由此可知,为了制备优质耐久的泡沫混凝土,需要对从材料制备到材料使用阶段的多种因素进行统筹考虑。

2 微观结构对宏观性能的影响

泡沫混凝土独特的孔结构对其诸多性能具有十

分重要的影响。材料的力学性能、密度、导热性、体积稳定性、吸水性、渗透性以及综合耐久性等都直接或间接地与孔隙率、孔径尺寸、孔径分布及孔表面积有关。

2.1 对自重的影响

泡沫混凝土的孔隙率与材料密度关系密切,从而影响材料自重。

$$p = (\rho - \rho_0) / \rho \times 100\%, \quad (1)$$

式中: p 为泡沫混凝土的孔隙率,%; ρ_0 为参照 JC/T 266—2011《泡沫混凝土》测试出的样品干密度, g/cm^3 ; ρ 为参照 GB/T 208—1994《水泥密度测定方法》测定的干密度测试后样品的真密度, g/cm^3 。

2.2 对导热性能的影响

热量在物质之间的传递往往通过热传导、对流传热或辐射传热进行^[27]。由于泡沫混凝土中的孔隙率较大,因此以气体为主的热传导占主导地位。此时,复合材料有效导热系数 λ 的上界和下界(又称维纳边界)分别为并联和串联模型(式(2)、(3))^[28-29],显示材料导热系数与微观结构的关系,而 Maxwell 模型(式(4))^[28]将材料看作无相互作用的均一球体无序分散于基体中的简单两相复合,因此该热传导性模型仅考虑了气孔率对多相体有效导热系数的影响。

$$\lambda = (1-p)\lambda_1 + p\lambda_2, \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{1}{(1-p)\lambda_1 + p\lambda_2}, \quad (3)$$

$$\lambda = \lambda_1 \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 + 2p(\lambda_2 - \lambda_1)}{2\lambda_1 + \lambda_2 - p(\lambda_2 - \lambda_1)}, \quad (4)$$

式中: λ_1 为连续相的导热系数; λ_2 为分散相的导热系数; p 为气孔率, %。

不同于其他的两相复合材料,泡沫混凝土的导热系数不仅与内部的固相与气相的导热系数有关,还与泡沫在基体中所形成的气孔形态、分布、相对含量和相互作用关系密切。Maxwell 模型未考虑气孔的形状与相互作用,因此预测结果与实际结果有一定差距。Crosser 和 Hamilton 加入对气孔形状的考虑,改进了 Maxwell 模型,提出 Hamilton-Crosser 模型^[28]:

$$\lambda = \lambda_1 \left[\frac{\lambda_2 + (n-1)\lambda_1 + (n-1)p(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_2 + (n-1)\lambda_1 - p(\lambda_2 - \lambda_1)} \right], \quad (5)$$

式中: n 为形状系数, $n=3/\psi$, 其中 ψ 为粒子的球形度。

在粒子的形状为球形, $\psi=1$ 且 $n=3$ 时,该模型可以简化为 Maxwell 方程。Hasselman 等在考虑球形分散相尺寸对导热性能所产生影响的研究基础上,改进 Maxwell 模型,推导出 Hasselman 模型^[28]。该模型明确了气孔尺寸对材料导热系数的影响。近年来又出现了有效介质理论模型、数学推导出的 Levy 模型和通用模型等^[30-31],将两相材料的 2 种组成看成各自均匀分布在材料中,根据相对量的多少,2 种成分均单独传热。

2.3 对机械强度的影响

作为建筑材料,强度是泡沫混凝土的一个重要性能。多孔材料的强度不仅取决于其基体强度,也与孔结构密切相关,包括孔隙率、孔径尺寸和形状^[32-33]。周顺鄂等^[34]研究发现,泡沫混凝土机械强度主要受 3 种因素影响:基材性能、容重、气孔形态分布与孔壁缺陷。其中影响最大的因素是基材性能和容重,泡沫混凝土的屈服强度一般随着容重的增大而提高。次级影响因素是气孔形态分布与孔壁缺陷。一般而言,材料中孔隙分布越均匀,孔径越小,材料机械强度越好。以下为 2 种强度与孔隙率的经验关系模型^[35],Kearsley 等^[36]研究获得的实验数据可以较好地符合以上 2 个经验模型。其中 Balshin 模型为

$$f_c = f_{c,0}(1-p)^m, \quad (6)$$

代入 Kearsley 等的实验数据,得相关系数为 0.962 时,

$$f_c = 321(1-p)^{3.6}; \quad (7)$$

Ryshkevitch 模型为

$$f_c = f_{c,0}e^{-kp}, \quad (8)$$

代入 Kearsley 等的实验数据,得相关系数为 0.943 时,

$$f_c = 981e^{-7.43p}, \quad (9)$$

式中: f_c 为泡沫混凝土的强度, $f_{c,0}$ 为泡沫混凝土孔隙率为 0 时的强度, m 、 k 为经验常数。

Kearsley 等的实验数据经过多次验证可以较好地符合以上 2 个经验模型,证实泡沫混凝土的强度与孔结构关系密切;而 Kumar 等^[37]研究发现,当孔隙率小于一定值后,材料的孔隙率与强度无法应用以上模型。

2.4 对渗透性的影响

泡沫混凝土的渗透性虽然受总孔隙率的正向激励作用,但是两者并非简单的函数关系。原因是即使孔隙率相同的泡沫混凝土也可以有不同的孔径分布、渗透路径与孔隙连通性,而这些因素对渗透性有更为显著的影响。研究证实,孔径小于 132 nm 的孔隙数量不会影响混凝土的渗透性^[38]。Katz-Thompson 渗透理论方程^[39-40]为典型混凝土透水性与孔结构关系模型:

$$K = 1/266l_{cr}^2 0.18(f - f_{cr})^2, \quad (10)$$

注: K 为渗透系数; f 为毛细孔隙率,%; f_{cr} 为压汞实验所测得的临界孔隙率,%; l_{cr} 为临界孔径, μm 。

上述微观结构与宏观性能的关系模型多为经验模型,无法从机理的角度对泡沫混凝土建模并准确预测其宏观性能,并且在控制孔结构与孔径的相关理论分析和技术验证方面也存在很多难点,有待更深入地研究。

3 影响泡沫混凝土微观结构的因素

泡沫混凝土的微观性能是由胶凝材料、集料、矿物混合材、外加剂及搅拌方式等因素共同作用的结果^[41],

因此了解这些因素的作用机理对于控制泡沫混凝土的微观结构至关重要。

3.1 胶凝材料

水泥是泡沫混凝土的主要胶凝材料,起胶结作用,也是强度的主要来源。水泥通过其类型和矿物组成、细度、粒径分布来影响泡沫混凝土的微观结构。能用来制备泡沫混凝土的水泥种类繁多,如普通硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、高铝水泥等等。用于制备泡沫混凝土的胶凝材料需要具备初凝时间稳定、早期强度高特性,原因是水泥强度一般会对由其制备的泡沫混凝土的抗压强度有较大影响。

3.2 集料

泡沫混凝土多不使用集料,有时由于性能的特殊要求而需要加入不同的集料。常用的集料有珍珠岩、废聚苯泡沫颗粒、浮石、沸石、炉渣、粉煤灰漂珠、秸秆粉等。集料的矿物组成、织构、粒径分布、开口孔隙率和饱水程度都会对泡沫混凝土的微观结构产生影响^[42]。集料的矿物组成与表面结构会影响到水化产物,特别是氢氧化钙和钙矾石的成核生长,从而影响泡沫混凝土的微观结构,影响材料整体的力学性能^[43]。

3.3 矿物混合材

矿物混合材按材料性质可以分为活性混合材和非活性混合材 2 种。活性混合材以及具有潜在活性的混合材,如硅灰、偏高岭土、粉煤灰、火山灰质混合材、粒化高炉矿渣等,可以与氢氧化钙反应,提高材料密实度,同时减小气-液界面张力,并且附着的混合材颗粒提高了气泡膜的强度,提升了气泡的稳定性,在提高材料强度的同时减少了泌水^[44]。Narayanan 等^[45]的研究证实,粉煤灰的加入可以细化泡沫混凝土的孔隙,有效减小孔径。另外需要注意,混合材的形态效应,如粉煤灰的减水效果,是由球形粉煤灰粒子起到滚珠作用,加强了浆体的流动性而导致的^[46]。

3.4 发泡剂

发泡剂按成分大致可分为松香树脂类、合成表面活性剂类、蛋白质类、复合类和其他类^[1]。根据基本力学原理,泡沫形状越接近球形,整体上受力越匀称,泡沫越稳定,抗压强度也越大,因此优质稳定的泡沫可以有效地提高泡沫混凝土的机械强度,维持尽可能多的圆球形的气孔来提高其强度。Just 等^[47]通过调整发泡剂的加入量来控制泡沫混凝土的孔径分布与孔隙率,并证实当水灰比减小时,受稠度增加的影响,小泡沫相对较难结合成大泡沫,从而有效减小泡沫混凝土孔径。

3.5 外加剂

能在泡沫混凝土中添加的外加剂种类繁多且功能各异,减水剂、促凝剂、纤维是 3 种基本外加剂。

3.5.1 减水剂

减水剂对泡沫混凝土微观结构的主要影响^[48]如下:1)破坏絮凝的胶凝材料团,释放包裹于其中的水分,增加水泥的分散性,使泡沫混凝土浆料更加均匀,提高浆料的和易性,改善泵送的流动性;2)缩短搅拌时间,使破泡的概率减小;3)提高泡沫混凝土浆料的黏性与内聚性,利于泡沫稳定,使其上浮、合并的概率减小。此外,需慎重选择与发泡剂有良好相容性的减水剂,以免出现消泡等不利影响。

3.5.2 促凝剂

在泡沫混凝土浆体成型的过程中,促凝剂的加入可以加快硅酸盐水泥浆体的水化,防止塌模现象;同时,由于加快了硅酸盐水泥的水化,使泡沫的稳定时间与胶凝材料的凝结时间相匹配,因此硬化浆体的孔隙率增大。

3.5.3 纤维

多种纤维可改善泡沫混凝土的孔结构特征,从而改善材料力学性能和耐久性^[49]。例如,掺加聚丙烯纤维后,泡沫混凝土内部的气孔结构明显加固。Laukaitis等^[50]证实,纤维可以在料浆内部起到类似晶核的作用。拌合过程中,纤维表面形成晶核中心,促进了CaO-SiO₂-H₂O(C-S-H)凝胶的生成,起到细化孔隙作用。

3.6 配合比以及成型工艺等因素的影响

整个材料的配合比包括胶凝材料、混合材用量、水量和外加剂掺量等因素,每个因素的改变都会引起材料微观结构的改变。水灰比是料浆配合比中尤为重要的因素,水灰比过小时,料浆流动度过小,黏度过大,泡沫难以进入,进入后也无法支撑界面压力,导致破泡、气泡变形等问题出现;水灰比过大时,料浆流动度过大,无法使泡沫稳定留存,易发生逸泡、离析现象^[51]。为了使所有泡沫尽量细密、均匀地分布在料浆中,必须采用先进的浆体搅拌工艺,满足以下要求^[52]:料浆整体均匀,不分层,无浮泡;泡沫损失率最好小于5%,不应大于10%;料浆稳定性好,无塌陷现象;稠度适宜,浇筑后无大量泌水。养护条件将影响胶凝材料的水化速度以及成核生长过程。宏观来看,温度和时间控制得当时,制得泡沫混凝土的孔结构多为闭合;而当温度和时间控制不得当时,泡沫混凝土的孔结构出现大量开孔结构,对材料性能有很大影响^[53]。

4 结束语

泡沫混凝土在建筑节能、工程回填等方面有显著优势,发展空间广阔。目前受国内发泡剂功能偏少、总体质量不高等因素影响,制得的泡沫稳定性较差,使材料缺陷的概率明显增大,严重影响了材料强度。国

内广泛使用的高速机械搅拌方式,存在制泡均匀性较差、工艺控制技术粗糙、泡沫不宜储存等问题,造成了泡沫混凝土在现场大面积浇注方面的局限性。本文中通过简要分析从材料制备开始直至最后的使用阶段中泡沫混凝土微观结构的形成和劣化机理,以及介绍现有各种微观结构与宏观性能之间的关系模型,分析了影响泡沫混凝土微观结构的各种可能因素以及泡沫混凝土微观结构对材料性能的影响,有望在当前研究的基础上,对泡沫混凝土的制备条件和工艺参数控制进一步改进和探索。

参考文献(References):

- [1] 闫振甲,何艳君. 泡沫混凝土实用生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 1-3.
- [2] WONG I L, EAMES P C, PERERA R S. A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications[J]. Solar Energy, 2007, 81(9): 1058-1071.
- [3] 蔡娜. 超轻泡沫混凝土保温材料的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [4] 谢明辉. 大掺量粉煤灰泡沫混凝土的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2006.
- [5] KUNHANANDAN E K, RAMAMURTHY K. Air-void characterization of foam concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(2): 221-230.
- [6] JOSSERAND L, COUSSY O, LARRARD F D. Bleeding of concrete as an ageing consolidation process[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1603-1608.
- [7] BASHEER L, BASHEER P A M, LONG A E. Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the micro-structure characteristics of ordinary Portland cement concrete[J]. Constr Build Mater, 2005, 19(9): 682-690.
- [8] 董华, 钱春香. 骨料尺寸对微区泌水及界面区结构特征的影响[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(3): 334-337.
- [9] DIAMOND S. The microstructure of cement paste in concrete[C] // Proceedings of 8th international congress on the chemistry of cement. Vol I. Rio de Janeiro: Finep, 1986: 122-147.
- [10] ELSHARIEF A, COHEN M D, OLEK J. Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(11): 1837-1849.
- [11] 张欣, 叶剑锋, 周海兵, 等. 新型外墙保温隔热材料的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(5): 982-984.
- [12] 蒋晓曙, 李莽. 泡沫混凝土的制备工艺及研究进展[J]. 混凝土, 2012(1): 142-144.
- [13] ZHANG M H, TAM C T, LEOW M P. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(10): 1687-1694.
- [14] 郑峰. 水泥基材料自收缩的动力学研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [15] TAZAWA E, MIYAZAWA S. Influence of cement and mixture on autogeneous shrinkage of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(2): 281-287.
- [16] BISSCHOP J, PEL L, van MIER J G M. Mechanisms of drying shrinkage microcracking in concrete [M]. // ULM F J, BAZANT Z

- P, WITTMANN F H. Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 2001: 75–81.
- [17] DELA B F, STANG H. Two-dimensional analysis of crack formation around aggregates in high-shrinkage cement paste[J]. Eng Fract Mech, 2000, 65(2/3): 149–164
- [18] BENTZ D P, GEIKER, HANSEN K K. Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement paste and mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(7): 1075–1085.
- [19] OLSON R A. The microstructure of Portland cement paste and its relationship to drying shrinkage: a study of blended cement paste [D]. Illinois: Northwestern University, 1998.
- [20] MEHTA P K. Studies on chemical resistance of low water/cement ratio concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1985, 15(6): 969–978.
- [21] DELA B F, STANG H. Two-dimensional analysis of crack formation around aggregates in high-shrinkage cement paste[J]. Eng Fract Mech, 2000, 65(2/3): 149–163.
- [22] 莫祥银, 卢都友, 许仲梓. 化学外加剂抑制碱硅酸反应原理及进展[J]. 南京化工大学学报: 自然科学版, 2000, 22(3): 72–76
- [23] FOURNIER B, BRUB M A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implication[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(2): 167–191.
- [24] 李相国, 刘敏, 马保国, 等. 孔结构对泡沫混凝土性能的影响与控制技术[J]. 材料导报, 2012, 26(4): 142–144.
- [25] TIKALSKYA P J, POSPISIL J, et al. A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(5): 889–890.
- [26] 余红发. 抗盐卤腐蚀的水泥混凝土的研究现状与发展方向[J]. 硅酸盐学报, 1999, 27(2): 238–245.
- [27] NUSSBAUMER T, WAKILI K G, TANNER C. Experimental and numerical investigation of the thermal performance of a protected vacuum insulation system applied to a concrete wall[J]. Applied Energy, 2006, 83: 841–855.
- [28] 李翔宇, 赵霄龙, 郭向勇, 等. 泡沫混凝土导热系数模型研究[J]. 建筑科学, 2000, 26(9): 84–86.
- [29] 奚同庚. 无机材料热物性学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
- [30] WANG J F, CARSONJ K, NORTHM F, et al. A new approach to modeling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 3075–3083.
- [31] WANG J F, CARSONJ K, NORTHM F, et al. A new structural model of effective thermal conductivity for heterogeneous materials with co-continuous phases[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51: 2389–2397.
- [32] JAMBOR J. Pore structure and strength development of cement composites[J]. Cement and Concrete Research, 1990, 20(6): 948–954.
- [33] TANG Luping. A study on the quantitative relationship between strength and pore size distribution of porous materials [J]. Cement and Concrete Research, 1986, 16(4): 87–96.
- [34] 周顺鄂, 卢忠远, 焦雷, 等. 泡沫混凝土压缩特性及抗压强度模型[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(11): 10–12.
- [35] RÖBLER M, ODLER I. Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes: I: effect of porosity[J]. Cement and Concrete Research, 1985, 15(2): 320–330.
- [36] KCARSLCY E P, WAINWRIGHT P J. The effect of porosity on the strength of foamed concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(2): 233–239.
- [37] KUMAR R, BHATTACHARJEE B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(1): 155–164.
- [38] 李淑进, 赵铁军, 吴科如. 混凝土渗透性与微观结构关系的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2004(2): 6–8.
- [39] CHRISTENSEN B J, MASON T O, JENNINGS H M. Comparison of measured and calculated permeabilities for hardened cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(9): 1325–1334.
- [40] KATZ A Z, THOMPSONA H. Prediction of rock electrical conductivity from mercury injection measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1987, 92: 599–607.
- [41] POURCHEZ J, RUOT B, DEBAYLE J, et al. Some aspects of cellulose ethers influence on water transport and porous structure of cement-based materials[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(2): 242–252.
- [42] ALEXANDER M G. Aggregate and the deformation properties of concrete[J]. ACI Mater J, 1996, 93(6): 569–576.
- [43] 陈惠苏, 孙伟, PIET S. 水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述: 二: 界面微观结构的形成、劣化机理及其影响因素[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(1): 71–76.
- [44] 石丹. 硅酸盐无机发泡保温隔热材料的制备及其改性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
- [45] NARAYANAN N, RAMAMURTHY K. Microstructural investigations on aerated concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(3): 457–464.
- [46] 王秀源. 超细粉煤灰在高性能混凝土中的作用效用分析[J]. 广东建材, 2008(12): 22–23.
- [47] JUST A, MIDDENDORF B. Microstructure of high-strength foam concrete[J]. Mater Charact, 2009, 60(7): 741–748.
- [48] 潘志华, 陈国瑞, 李东旭, 等. 现浇泡沫混凝土常见质量问题分析及对策[J]. 新型建筑材料, 2004(1): 4–7.
- [49] 邓雯琴. 纤维混凝土的孔结构特征与耐久性分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2010.
- [50] LAUKAITIS A, KERIENĖ J, MIKULSKIS D, et al. Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products [J]. Construction Build Mater, 2009, 23(9): 3034–3042.
- [51] 黄土元. 从日本预拌混凝土标准的一条规定说起[J]. 混凝土, 2000, 17(1): 29–30.
- [52] 丁曼. 防水性泡沫混凝土研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2011.
- [53] 涂欣. 硼硅酸盐泡沫玻璃和微晶泡沫玻璃的研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.