

磷石膏陶粒混凝土的制备与研究进展

许姜鹏, 谢一铭, 董洪承

扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏 扬州

收稿日期: 2022年9月9日; 录用日期: 2022年9月29日; 发布日期: 2022年10月12日

摘要

磷石膏作为化工厂生产磷酸时的副产物, 主要成分为二水硫酸钙, 整体呈酸性, 含有磷酸、氟等有害物质, 且放射性超标, 露天堆存会对环境造成污染。将磷石膏与多种物料进行复合可以制备新型材料, 其在性能、实用性等方面都不逊色于原材料, 此举可以有效提高磷石膏的利用率, 缓解因磷石膏堆存所引起的较为严重的环境问题, 为环境治理提供了新途径。本文通过结合国内外相关学者对磷石膏、陶粒在建筑领域与桥梁工程的研究利用现状, 探讨磷石膏与陶粒对混凝土性能的影响因素, 并综合评价磷石膏、陶粒在新型混凝土中所发挥的作用。

关键词

工业固废, 磷石膏, 陶粒, 轻质混凝土

Preparation and Research Progress of Phosphogypsum Ceramsite Concrete

Jiangpeng Xu, Yiming Xie, Hongcheng Dong

College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: Sep. 9th, 2022; accepted: Sep. 29th, 2022; published: Oct. 12th, 2022

Abstract

Phosphogypsum as a by-product of phosphoric acid production in chemical plants, the main component is calcium sulfate dihydrate, which is acid and contains phosphoric acid, fluorine and other harmful substances; and when the radioactivity exceeds the standard, open storage will cause environmental pollution. By combining phosphogypsum with a variety of materials, new materials can be prepared, which is not inferior to raw materials in terms of performance and practicability, and can effectively improve the utilization of phosphogypsum, alleviate the more serious envi-

ronmental problems caused by the accumulation of phosphogypsum, and provide a new way for environmental governance. Based on the research and utilization status of phosphogypsum and ceramsite in the field of construction and bridge engineering by relevant scholars at home and abroad, this paper discusses the influencing factors of phosphogypsum and ceramsite on the performance of concrete, and comprehensively evaluates the role played by phosphogypsum and ceramsite in new concrete.

Keywords

Industrial Solid Waste, Phosphogypsum, Ceramsite, Concrete

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在建筑工程领域应用的材料被称为建筑材料，建筑材料种类繁多，按照其特点可以分为有机材料、无机材料和复合材料。有机材料主要包括塑料、羊毛、棉花、天然橡胶等，其中生活中用的最多的是塑料。无机材料主要包含金属材料和非金属材料，金属材料可分为有色金属材料和黑色金属材料，非金属材料品类众多，常见的有水泥、人造石墨、特种陶瓷、合成橡胶、合成树脂、石膏等。复合材料通常由有机材料与无机非金属材料复合而成，其中，常见的沥青混凝土就属于复合材料。

在众多的建筑材料中，无机材料应用范围最广，使用量最大，石膏制品就属于无机材料，并且它在建筑工程领域应用广泛。石膏分为天然石膏和工业副产石膏，天然石膏是由化学沉积作用形成的，由其制成的各类石膏制品具有抗震耐火、节能环保等特点，在工程领域常被用于装饰、隔断粉刷等，是一种十分优良的建筑材料。在我国虽然天然石膏总储量较大，但优质天然石膏的总量较少，所以众多学者一直在积极探索利用工业副产石膏代替天然石膏的方法，这也是基于我国未来发展石膏产业的一个总体趋势。工业副产石膏主要包括脱硫石膏、钛石膏、氟石膏、柠檬酸石膏渣和磷石膏。在众多的工业副产石膏中，磷石膏和脱硫石膏的物化性能与天然石膏接近，但磷石膏的造价相比脱硫石膏更低，因此，大力推广磷石膏的使用可降低一定的生产成本。

磷石膏是湿法磷酸生产磷肥时产生的固体废弃物，主要有灰黑色和灰白色两种。每生产 1 吨湿法磷酸，产生磷石膏会超过 3.6 吨，据统计，这些磷石膏主要产自国内的化肥企业、磷酸氢钙企业和磷酸盐企业，这一类企业大多分布于贵州、湖北和云南等地[1]。截至目前，我国磷石膏堆存量已超过 2.98 亿吨。同时，每年还在新增 5000 万吨，且有不断增长的趋势。虽然磷石膏产量巨大，但在我国其综合利用率很低，尤其是在建筑工程领域，我们对磷石膏的开发利用程度相较于日本等国家还比较低。在我国磷石膏可资源化的途径主要有改良土壤、生产化肥、制造石膏板以及粉刷石膏等。磷石膏成分复杂、杂质难除是其难以大量利用的主要原因。除此以外，磷石膏主产区位于云南、贵州等偏远地区，施工地点距其较远导致运输成本高、运输半径长[2] [3]。这些原因导致我国磷石膏尚处于初级利用阶段，据统计，每年产出的磷石膏中只有不到 50% 可以被工业、农业等有效利用。而无法被利用的磷石膏只能被不经过任何处理直接堆积，大量的磷石膏露天堆存会对环境造成污染。例如磷石膏中的可溶性磷溶于水后，可以伴随着雨水污染河流湖泊，导致绿植和农作物枯死，甚至可以渗入地下污染地下水。

2018 年 12 月，国务院办公厅印发《“无废城市”建设试点工作方案》，文件着重引领工业绿色发

展方式和生活方式, 聚焦减少工业固体废弃物和增加工业固体废弃物利用量, 文件中重点强调了把磷石膏作为典型, 对磷石膏的产量严加把控, 以利用量为指标用多少产多少, 以此来解决磷石膏产量大、利用量低的问题。

面对日益增长的粘土砖替代品需求和迫切的磷石膏资源化再利用需要[4], 本文主要阐述了磷石膏与陶粒的研究现状, 并总结了磷石膏与陶粒在混凝土中的广泛应用, 并提出了一种磷石膏与陶粒相结合的新思路, 制成磷石膏陶粒轻质混凝土, 以期提高磷石膏的利用率, 从而达到减少磷石膏堆存、减轻磷石膏对环境污染和实现可持续发展的目的。

2. 磷石膏的研究现状

2.1. 磷石膏概述

磷石膏是湿法磷酸工艺生产磷肥时产生的固体废弃物。目前全世界每年磷石膏的总产量约 1 亿~2.8 亿吨, 其中我国的年产量已经超过 5000 万吨, 总储量超过 2 亿吨。虽然磷石膏产量巨大, 但是其利用率却很低, 因为虽然磷石膏的主要组分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 但除此以外磷石膏还含有一些可溶性和不可溶性杂质, 在应用过程中, 这些杂质会影响磷石膏的性能[5] [6]。

杂质可以分为有机质和无机质两种。这些杂质会影响磷石膏的使用性能, 例如磷的存在会增加磷石膏的凝结时间, 使得磷石膏硬化体水化后的强度下降, 所有形式的磷中又以可溶磷对磷石膏硬化体的性能影响为最。可溶性磷会随着雨水流入地表水, 会造成河流湖泊水体富营养化; 可溶性磷溶解于水后进入土壤, 会使其酸化, 导致绿植或农作物不能生长或枯死; 含磷的水进一步渗入地下河, 造成地下水污染, 人长期饮用会对身体健康造成伤害[7] [8]。

所以磷石膏在堆放时需要进行处理, 或者对其堆放场地进行特殊处理, 减少其杂质对环境产生污染。同时, 磷石膏在应用于各行业之前, 必须经过预处理去除其中的杂质, 减少其对磷石膏应用性能产生不良影响。

而预处理是指磷石膏在应用于各行业前, 必须经过一系列的处理以去除其中的杂质, 使其性能满足实际应用需求。磷石膏预处理的方法有球磨法、水洗法、筛分法、中和法、煅烧法以及陈化法等等。虽然磷石膏的杂质种类和预处理的方式众多, 但是往往一种方式只能针对性地处理某一类杂质, 目前尚无可以一次性去除所有杂质的办法。因此, 在利用磷石膏时, 要选择适当的方法有针对性地除杂, 确保磷石膏可以满足实际应用时的需求。

也正是因为磷石膏在我国各种废弃石膏中占比最大, 并且简单的处理方式会引发更为严重的环境问题, 同时其预处理成本较高, 所以磷石膏的广泛应用遭到了严重影响[9] [10]。目前我国工业副产石膏磷石膏已经广泛应用到建筑材料、水泥缓凝剂、农业肥料等不同领域, 但是这些领域磷石膏往往只是作为辅料, 利用率低, 绝大部分的附加值利用仍然不高[11] [12] [13]。目前, 磷石膏的利用途径主要集中在以下几个方面, 如制备道路填料、制备石膏建筑材料、制备水泥等。

2.2. 磷石膏的应用现状

2.2.1. 制备道路填料

磷石膏可用作道路填料。将磷石膏用作高等级公路的基层填充材料, 能够对一些大量堆存的磷石膏进行有效利用, 同时还能降低高等级公路的造价。也有学者将磷石膏进行处理后制备成石膏晶须[14], 作为沥青混合料的填料, 在沥青中得到了广泛的应用。

2.2.2. 制备石膏建筑材料

磷石膏可以通过一系列的处理后做成石膏建筑材料。磷石膏经煅烧及陈化等处理后, 可以做成石膏

基板材、石膏基砖块、石膏基砌块等。Jun Zhou 等[15]以单一磷石膏为原材料,将脱水的磷石膏加水造粒,压制成型,间歇压制水化制备成新型无纸无纤维石膏板。制成的石膏板抗弯强度可达到 14.7 MPa。该石膏板不含纸张、纤维和添加剂,是一种阻燃、经济、环保的新型墙体材料,可有效利用磷石膏。熊春杨[16]通过一系列实验室试验,研究出了合适的工艺参数:陈化时间为 4 d、煅烧温度为 150℃、煅烧时间为 30 min、煅烧设备为微波马弗炉。利用此工艺煅烧磷石膏,可以得到含有 81.11%半水石膏的建筑石膏,同时该建筑石膏的抗折强度和抗压强度符合国家规定的优等品标准。

2.2.3. 制备水泥

磷石膏可以制作水泥。磷石膏可以用于制作普通硅酸盐水泥,GM Sadiqul Islam 等[17]通过对水泥膏体、砂浆和混凝土的性能评价,发现在水泥熟料中添加 5%~10%磷石膏时,对水泥性能的提高效果较好。磷石膏可以用于制作超硫化水泥(SSC),Shuhua Liu 等[18]将磷石膏进行煅烧预处理,可以制备出各方面性能更好的超硫化水泥。磷石膏经 350℃煅烧 2 h 后掺入水泥,使得水泥固化时间缩短了 90%,使掺入磷石膏的超硫化水泥达到了现行标准的要求;磷石膏经 600℃煅烧 2 h 后掺入水泥,使得水泥早期和后期强度的提高效果最好。

综上所述,虽然磷石膏被广泛应用于各行业,但是其总利用量较低,每年仍旧会有大量的磷石膏堆积。因此,不仅要努力提高现有可利用磷石膏行业的利用量,更要求大家继续钻研更多的磷石膏综合利用、处理的办法,扩大磷石膏的应用范围[19]。

3. 陶粒的研究现状

3.1. 陶粒概述

陶粒是近年来使用较为频繁的新型绿色建筑材料之一,通常是通过高温烧焙而成,其表面大多为光滑的釉面,摩擦力较小。因其内部轻质且疏松多孔的特性,陶粒的堆积密度和表观密度相较于石子、卵石等粗集料都较小。可以作为粗集料来制备轻集料混凝土。若按照原料来划分,陶粒通常以页岩、黏土、污泥、建筑渣土等废弃物作为原料。过高温烧制所得,属于可再生的环保材料。按形状及制备工艺不同来划分,陶粒可分为圆球形、破碎性。不同形状的陶粒其堆积密度的差异较大、筒压强度、吸水率也会有所不同,会很大程度上影响陶粒混凝土的各种性能。按照强度等级来划分,国家标准制定出 300~1000 级等各种等级的陶粒,各种强度的陶粒可以用来制作不同保温结构、承重结构的混凝土,应用广泛[20]。

制备陶粒的原料多为黏土、页岩等天然材料,如今随着工业的发展,陶粒的应用范围变广,导致需求量大幅增加。同时随着绿色建设的完善,制备材料也逐渐转向建筑固废、工业垃圾等工业固废,可以有效减少碎石的消耗,最大建筑耗能减少了 40%~60%,能够满足当前的建筑及环境要求[21]。

3.2. 陶粒混凝土的应用现状

陶粒混凝土是将陶粒代替石子作为粗骨料,轻砂或者普通砂作为细骨料、混合水泥、水配制成的混凝土。陶粒混凝土从严格意义上来说属于轻骨料混凝土,是其表观密度不大于 1950 kg/m³的混凝土。按细骨料的掺量分类,全为轻砂调配而成的陶粒混凝土属于全轻混凝土,若是轻砂和普通砂混合而成的陶粒混凝土则属于轻砂混凝土[22]。根据轻集料混凝土用途分为三种即保温轻集料混凝土、结构保温轻集料混凝土、结构轻集料混凝土[23]。

3.2.1. 应用建筑结构

如今,在发达国家中高性能陶粒混凝土已在工程中大量使用,并取得了丰富的技术和经济经验[24]。20 世纪 60 年代中期,美国修建的休斯顿贝壳广场大厦,该楼总共 52 层,高度为 218 米。修建过程中采

用陶粒混凝土取代普通混凝土,取得了显著的技术经济效益[25]。90年代初美国研制出页岩陶粒并应用到建筑工程、桥梁工程和船舶制造行业中,用它配制成的陶粒混凝土的抗压强度可以达到30 MPa~35 MPa [26]。2001年,美国在California建成了总长2716米,最大跨度200米的Benicia-Martinez桥,该桥采用28天抗压强度为45 MPa,干表观密度 1920 kg/m^3 的陶粒混凝土取代普通混凝土修建[27]。

我国湖北宜昌生产的高强陶粒制备出的轻骨料混凝土[28],目前,年产量达500万 m^3 ,累计建成轻骨料混凝土建筑面积2000多万 m^3 [29]。在此背景下,国内的一些建筑工程也开始使用陶粒的混凝土。主要用作制作预制保温墙板和砌块、预制式保温屋面板、现场浇筑楼板材料、浇筑钢筋轻骨料混凝土剪力墙等。如温州大学学生宿舍采用陶粒复合保温砌块,上海建科院承接的世贸商城、证券大厦和上海大学等的屋面工程采用了预制式保温屋面板和现浇轻骨料混凝土[30] [31]。

同时通过对轻骨料混凝土研究和实践工作的发展,俞静[32]提出了陶粒混凝土自保温结构体系,指用陶粒轻骨料混凝土作为承重结构构件(梁、板、柱)材料,采用保温性能相对较好的砌块(如加气混凝土砌块、轻骨料混凝土砌块、烧结砖等),不需要黏贴任何保温材料,只需在墙体内外做简单的抹灰处理,就能基本达到南方地区规范对外墙平均传热系数的要求,做到自保温。有别于传统意义上的外墙自保温体系,用陶粒轻骨料混凝土代替传统的普通混凝土作为承重结构材料应用于建筑物,借助轻骨料混凝土导热系数低的优势,从根本上改善建筑热部分的保温性能。无需任何内外保温做法,就可以基本满足南方地区规范对外墙平均传热系数的要求,做到真正意义上的自保温。

3.2.2. 应用桥梁工程

20世纪90年代初期,日本对高性能陶粒混凝土的生产工艺进行了研究,取得了一定的成果,改善了高性能陶粒混凝土的工作性和耐久性。其被广泛用于海上钻井平台等桥梁工程上[33],英国修建了海上石油钻井平台,挪威修建了北部地区的悬索桥[34]。该工程中使用的结构陶粒混凝土的抗压强度最高可达到80 MPa,其表观密度在 $1800\sim 2000 \text{ kg/m}^3$ 之间。

4. 磷石膏、陶粒混凝土相关研究现状

通过阅读相关文献可发现,一些学者将磷石膏或陶粒掺入混凝土中用于制备轻质混凝土,可发现掺入磷石膏或陶粒对混凝土的力学性能有些许的提升,但是将磷石膏与陶粒相结合掺入混凝土的相关研究较少。因此,本文主要阐述了不同掺量的磷石膏和陶粒对混凝土性能的影响。

4.1. 磷石膏混凝土相关研究现状

张畅[35]研究发现未经处理的磷石膏会对混凝土的凝结时间产生较大的影响,产生过分缓凝的现象。但是经过水洗法及石灰中和法处理过后的磷石膏混凝土的凝结时间已经满足要求,水洗法的混凝土的凝结时间要低于石灰中和法,但是经过对环境的影响的考虑,石灰中和法为最优选择。

许晴莹[36]在研究磷石膏陶粒泡沫混凝土中通过改变球磨时间发现,球磨的预处理方式可以有效改善磷石膏的粒径分布,提高磷石膏硬化体的力学性能。当水泥掺量为50%时,可有效提高磷石膏-水泥复合胶凝材料的强度;随着球磨时间的延长,磷石膏-水泥复合胶凝材料的3d、28d干、湿力学性能呈现先上升后下降的趋势,峰值点均为球磨时间的15 min时,此时磷石膏中位径约为 $29 \mu\text{m}$ 。同时,球磨增大了磷石膏粉体的比表面积,同时降低了磷石膏-水泥复合胶凝材料的流动度,缩短了胶凝时间。水泥的掺入提高了磷石膏-水泥复合胶凝材料的28d抗压强度及软化系数,改善了耐水性,延长了石膏制品的使用寿命。

球磨法不能除去磷石膏中的有害杂质,它是通过改善磷石膏的微观形貌和颗粒级配来提高磷石膏的性能的[37]。球磨可以使磷石膏的形貌多样化,颗粒粒度变小,从而增加磷石膏复合胶凝材料的流动度,

提高硬化体的致密度，最终提高胶凝材料的力学性能。

杨林[38]在研究时以未经处理的原状磷石膏为主要原料制备了免烧墙体砖，为磷石膏的处理开辟道路。研究了半水石膏、粉煤灰、矿渣掺量对砖的各性能的影响。综合比较后可知，掺入矿渣的砖的性能相对较好。合适的砂量是砖具有优异性能的保证；当以同等质量的矿渣或粉煤灰取代部分的砂时，砖的耐水性和抗冻性会有不同程度的降低。以水泥、磷石膏、矿渣、河砂质量比 10:65:10:15 为配方压制磷石膏标准砖，80℃蒸养 8 h 后抗压强度接近 20 MPa，再置于室内自然养护 28 天，其抗压强度达到 35 MPa 以上，且具有优异的抗冻性和耐水性能。该产品不仅能处理掉大量的磷石膏，而且可创造良好的经济效益和社会效益。

于万增[39]等在研究磷石膏作为混凝土添加剂对性能的改变时发现，磷石膏对混凝土具有缓凝和膨胀作用，可以激发矿物掺合料的活性，其在 C30 混凝土中的最佳掺量为 3.0%~4.0%。

田恬[40]等在研究磷石膏掺量对基体强度的影响时发现，磷石膏掺量在 0%~12% 范围内时，基体抗压强度随着磷石膏掺量的增加而增加。但超过这个范围后，强度会呈线性下降。多数磷石膏起到一定的填充作用，也有少量磷石膏作为硫酸盐激发剂激发体系中其他材料的活性。

李金鹏[41]在研究时计划将磷石膏用于制备预制混凝土砌块产品，用活性矿物掺和料和水泥共同固化磷石膏，以达到提高磷石膏消耗量的目的。其通过正交试验法设计了几组实验配合比，探究了磷石膏比例，矿物掺和料种类，水泥比例变化，减水剂和激发剂等因素对磷石膏基预制混凝土砌块力学性能的影响，通过多组试验使设计的比例可以达到使用要求。并且对砌块中残余的杂质磷元素进行水溶磷溶出试验，确定该产品对环境的影响。对水泥和矿物掺和料固化磷石膏的机理进行分析，探究了该材料体系强度增长的原理。结果表明，水泥 - 矿渣粉 - 粉煤灰体系可以提高磷石膏基预制混凝土砌块早期强度，在激发剂的作用下，磷石膏的掺量可以提高到 40%，胶凝材料中水泥的比例可以降到 10%，砌块强度可以达到 Cc20 的最低使用标准。而水泥 - 偏高岭土 - 粉煤灰体系在激发剂的帮助下同样可以使磷石膏的掺量达到 40%，且水泥的比例可以降到 5% 时，砌块强度仍可以达到 Cc30 等级。

王贻远[42]在研究中发现磷石膏、水泥、减水剂混合能够作为胶凝材料，磷石膏替代 5% 的水泥的胶砂抗折、抗压强度均满足 P.O42.5 水泥的强度指标要求。磷石膏替代 10%~15% 的水泥的胶砂抗折、抗压强度能达到 P.O32.5 水泥的强度指标要求。同时，磷石膏替代不大于 25% 的水泥的胶砂，磷石膏水泥复合胶凝材料的初凝时间和终凝时间明显加长，其标准稠度用水量也有较大程度的增大，但凝结时间跟安定性均合格。另外，在用磷石膏替代部分水泥、添加减水剂能够配制混凝土时，其中磷石膏替代小于等于 25% 的水泥配制的混凝土能达到 C30 混凝土标准要求，磷石膏替代 30% 的水泥配制的混凝土能满足 C25 混凝土强度要求。用磷石膏替代小于等于 25% 的水泥、添加 2.1% 减水剂配制的混凝土，其抗渗性能可达到 p12 抗渗等级要求。

4.2. 陶粒混凝土相关研究现状

李辛庚[43]研究发现陶粒混凝土中的陶粒作为其中的粗骨料相比于普通石子，具有强度低、重量轻、吸水率高等特点。

曾峥[27]研究表明，陶粒混凝土粗骨料为轻型材料，其中的集料(如页岩陶粒、黏土陶粒、粉煤灰陶粒)表面存在大量孔隙，表观密度较小，使得陶粒混凝土的容重大大降低，在相同的强度等级下，陶粒混凝土自重仅为普通混凝土自重的 70%~80%。同时陶粒混凝土弹性模量低，在地震时可以快速分散和吸收地震波所释放的能量，从而达到良好的减震效果。

王帅[44]研究发现陶粒表面比碎石粗糙，具有一定吸水能力，所以陶粒与水泥砂浆之间的粘结能力较强。在陶粒混凝土成型后，陶粒会吸收过多的水分，随着时间的延长，混凝土水分逐渐蒸发，陶粒又会

缓慢释放出内部的水分,使水泥石得到充分的养护,从而提高水泥石的密实性和强度。这种效应还改善了水泥石的孔结构,进一步提高了抗渗性能,因此陶粒混凝土抗有害介质侵入的能力也相对较强。另外使用陶粒能有效避免混凝土的碱集料反应问题,从而使建筑物的使用寿命延长,因此陶粒砼具有较高的抗渗能力和耐久性[45]。

田融昕[46]通过研究新型陶粒混凝土超长内隔墙板发现,该新型墙板可以有效地弥补普通陶粒内隔墙条板在接缝处易开裂的不足,并且能够提高施工效率,降低施工成本,同时节约自然资源。在对该新型墙板进行力学性能测试后,结合理论分析以及 ABAQUS 有限元模拟得出以下结论,陶粒混凝土超长内隔墙板不仅具备一般陶粒混凝土墙板自重轻、早期强度高以及保温隔热性能出色等优点,并在抗弯、抗冲击、抗吊挂以及抗压性能方面的表现均超出了现行规范要求。

刘林佩[20]研究发现不同陶粒种类主要影响陶粒的筒压强度与表观密度,筒压强度越高的陶粒制备出的陶粒混凝土抗压强度越高,其干表观密度也更大。同时得知将陶粒进行预湿可以有效地提高其混凝土的均质性和工作性能,因此在制备陶粒混凝土时,可以提前进行筒压强度测定选择合适的陶粒种类。

桂习云[47]通过研究四种掺合料对陶粒混凝土的抗压性能影响总结可得出以下结论:四种掺合料中,硅灰对陶粒混凝土抗压性能优化作用最强,最佳掺量为等量替代水泥 10%;其次是矿渣粉,最优掺量为 20%;粉煤灰对陶粒混凝土早期抗压强度不利,但在 28 d 时对混凝土强度有所提高,最佳掺量为 10%~20%;聚丙烯纤维的掺入对陶粒混凝土的抗压强度没有影响。

5. 结语

通过对于建筑固废和工业固废中的磷石膏和陶粒的总结归纳可以发现,磷石膏具有辅助胶凝材料特性,可以帮助混凝土改善凝结等性能,同时可以激发其他掺和料的活性从而增加混凝土中其他材料的强度。而且在一定比例范围内,也可以使用磷石膏代替水泥制备符合标准强度要求的混凝土。与普通混凝土相比,磷石膏在混凝土中的应用不仅解决了磷石膏处理上的难题,同时也加强了混凝土的强度与性能[42]。陶粒具有轻质、内部孔隙多等特征,可作为粗骨料用于制备轻质混凝土。利用建筑固废和工业固废取代部分水泥制备混凝土,不仅可以节约资源,还能缓解因磷石膏大量堆存而引起的环境问题。相关研究学者发现将磷石膏和陶粒结合运用到混凝土中,控制在适量的掺量下对混凝土的性能起到一定有利的影响。因此,将磷石膏作为辅助胶凝材料、陶粒作为粗骨料制备磷石膏陶粒混凝土可以为固废的资源化利用提供一条新的途径。

基金项目

2021 年扬州大学大学生科创基金项目(X20210448)。

参考文献

- [1] 张占彦. 磷石膏制备相变储能基体材料工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [2] 李光明, 李霞, 贾磊, 吴金玲. 国内外磷石膏处理和处置概况[J]. 无机盐工业, 2012, 44(10): 11-13.
- [3] 朱俭凯, 陈鹏. 推进宜昌矿业绿色发展[J]. 学习月刊, 2020(11): 40-42.
- [4] 袁伟. 利用磷石膏制备墙体材料可行性研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2009.
- [5] 丁萌, 李建锡, 李兵兵. 磷石膏中杂质及预处理对 α 半水石膏性能的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 4017-4021.
- [6] Geraldo, R.H., Costa, A.R.D., Kanai, J., Silva, J.S., Souza, J.D., Andrade, H.M.C., Gonçalves, J.P., Fontanini, P.S.P. and Camarini, G. (2020) Calcination Parameters on Phosphogypsum Waste Recycling. *Construction and Building Materials*, 256, Article ID: 119406. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119406>
- [7] 李美. 磷石膏品质的影响因素及其建材资源化研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012.

- [8] 袁鹏, 谭建红, 官洪霞, 蒋达波, 南鹏林. 磷石膏中有害杂质对环境影响的监测与评价[J]. 广东化工, 2013, 40(22): 124-125+104.
- [9] 杨晓梅, 赵清. 磷石膏化学成分的 ICP-AES 分析方法[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2008(6): 36-40.
- [10] 蒋达波, 谭建红, 袁鹏, 官洪霞, 南鹏林. 磷石膏中有害成分的无害化处理方法综述[J]. 吉林化工学院院报, 2014, 31(1): 33-36.
- [11] Ai, Y. and Xie, S.-K. (2020) Hydration Mechanism of Gypsum-Slag Gel Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **32**, Article ID: 04019326. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002974](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002974)
- [12] Wang, Q., Zhuang, S. and Jia, R. (2018) An Investigation on the Anti-Water Properties of Phosphorus Building Gypsum (PBG)-Based Mortar. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **136**, 1575-1585. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7825-3>
- [13] Hua, S., Wang, K., Yao, X., et al. (2015) Effects of Fibers on Mechanical Properties and Freeze-Thaw Resistance of Phosphogypsum-Slag Based Cementitious Materials. *Construction and Building Materials*, **121**, 290-299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.003>
- [14] 谭明洋, 相利学, 李国龙. 磷石膏在道路工程应用的研究现状[J]. 广州化工, 2016, 44(8): 37-38.
- [15] Zhou, J., Li, X.Q., Zhao, Y., Shu, Z., Wang, Y.X., Zhang, Y. and Shen, X. (2020) Preparation of Paper-Free and Fiber-Free Plasterboard with High Strength Using Phosphogypsum. *Construction and Building Materials*, **243**, Article ID: 118091. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118091>
- [16] 熊春杨. 磷石膏微波法制备建筑石膏及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
- [17] Sadiql Islam, G.M., Habib Chowdhury, F., Tanveer Raihan, M., Kumar Sikder Amit, S. and Rafiqul Islam, M. (2017) Effect of Phosphogypsum on the Properties of Portland Cement. *Procedia Engineering*, **171**, 744-751. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.440>
- [18] Liu, S.H., Ouyang, J.Y. and Ren, J. (2020) Mechanism of Calcination Modification of Phosphogypsum and Its Effect on the Hydration Properties of Phosphogypsum-Based Supersulfated Cement. *Construction and Building Materials*, **243**, Article ID: 118226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118226>
- [19] 赵青林, 吴科佩. 磷石膏废物资源利用浅析[J]. 河南建材, 2001(4): 7-9.
- [20] 刘林佩. 陶粒混凝土预制空心墙板制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆大学, 2021.
- [21] 李翔, 王晓龙. 高铁站候车大厅保温层中陶粒混凝土的应用[J]. 建材发展导向, 2022, 20(16): 25-28.
- [22] 赵勇, 吴智伟, 谢卓文, 王晓峰. 装配复合模壳体系混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(11): 36-45.
- [23] 李书明, 郑新国, 刘竞, 谢永江, 胡家林, 张旭. 钢管自密实轻骨料混凝土变形性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(5): 1497-1502+1528.
- [24] 付达新. 轻骨料混凝土的研究现状与展望[J]. 中国建材科技, 2009, 18(6): 47-51.
- [25] 雍本. 特种混凝土设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 8-11.
- [26] 钱慧丽, 杨宗华, 梁会忠. 轻集料的发展状况综述[J]. 商品混凝土, 2007(1): 5-7+23+74.
- [27] 曾峥. 改性陶粒混凝土力学性能及收缩性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [28] 肖汉光, 卢俊辉, 高斌. 宜昌高强陶粒的应用研究[C]//湖北省土木建筑学会学术论文文集(2000-2001 年卷). [出版者不详], 2002: 535-541.
- [29] 霍俊芳. 轻骨料混凝土的研究现状与发展[J]. 建筑技术, 2009, 40(4): 363-365.
- [30] 冯国峰. 陶粒混凝土复合保温砌块在节能建筑中的应用[J]. 墙材革新与建筑节能, 2009(5): 40-42+4-5.
- [31] 徐峰, 汪少华. 陶粒混凝土在高效屋面保温工程中的应用[J]. 房材与应用, 2002, 30(4): 16-18.
- [32] 俞静. 陶粒混凝土自保温结构体系相关技术研究[D]: [硕士学位论文]. 宁波: 宁波大学, 2012.
- [33] Sandvik, M. and Hammer, T.A. (1995) The Development and Use of High Performance Lightweight Aggregate Concrete in Norway. *International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Vol. 3, Sandefjord, 20-24 June 1995, 15-19.
- [34] 李明利, 李芳. 陶粒混凝土发展现状及研究进展[J]. 混凝土世界, 2010(9): 16-18.
- [35] 张畅. 磷石膏与菱镁矿尾矿粉对砂浆及混凝土收缩性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林建筑大学, 2020.
- [36] 许晴莹. 磷石膏陶粒泡沫混凝土及砌块的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [37] 马林转, 宁平, 杨月红, 陈玉保. 磷石膏预处理工艺综述[J]. 磷肥与复肥, 2007(3): 62-63.

-
- [38] 杨林. 利用磷石膏制备建筑材料的研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2013.
- [39] 于万增, 潘俊廷, 朱会荣, 等. 原状磷石膏用作混凝土添加剂的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(4): 28-30+42.
- [40] 田恬. 磷石膏泡沫混凝土的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.
- [41] 李金鹏. 大掺量磷石膏预制混凝土砌块及路面基层水稳材料的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2022.
- [42] 王贻远. 磷石膏制备胶凝材料和混凝土的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2014.
- [43] 李辛庚, 闫风洁, 岳雪涛, 王学刚. 陶粒混凝土的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11): 3407-3418+3452.
- [44] 王帅. 陶粒混凝土的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.
- [45] 赵明霞. 轻集料混凝土的研究和应用[J]. 散装水泥, 2011(2): 45-47.
- [46] 田融昕. 陶粒混凝土超长内隔墙板力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [47] 桂习云. 不同掺合料对陶粒混凝土路用性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.