

# 粉煤灰基地质聚合物煤矸石粗骨料混凝土 建筑工程适用性研究

乔光平, 雷 炎, 闫 博, 武海鹏\*

中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京

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

粉煤灰基地质聚合物煤矸石粗骨料混凝土是一种低碳排放、固体废弃物综合利用的绿色环保混凝土。综述了地质聚合物混凝土的性能与应用、煤矸石混凝土的性能与应用,在此基础上推测了粉煤灰基地质聚合物煤矸石粗骨料混凝土的基本性能,并针对性地提出了建筑工程中适宜应用的结构。综述表明,关于地质聚合物混凝土和煤矸石混凝土的研究主要包括配合比设计、构件力学性能和耐久性等,研究已相对较多,但关于工程应用仍然尚少;未见粉煤灰基地质聚合物煤矸石粗骨料混凝土的相关研究,需进行更多的关注,特别是在装配式钢筋桁架混凝土叠合板和轻型钢管混凝土柱中的适宜性应用研究。

## 关键词

粉煤灰, 地质聚合物, 煤矸石粗骨料, 工程应用

# Research on Applicability of Fly Ash Based Geopolymer Concrete with Coal Gangue Coarse Aggregate in Construction Engineering

Guangping Qiao, Yan Lei, Bo Yan, Haipeng Wu\*

School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing

Received: Sep. 9<sup>th</sup>, 2022; accepted: Sep. 29<sup>th</sup>, 2022; published: Oct. 12<sup>th</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 乔光平, 雷炎, 闫博, 武海鹏. 粉煤灰基地质聚合物煤矸石粗骨料混凝土建筑工程适用性研究[J]. 土木工程, 2022, 11(10): 1070-1078. DOI: 10.12677/hjce.2022.1110118

## Abstract

Fly ash based geopolymer concrete with coal gangue coarse aggregate is a kind of green environmental protection concrete with low carbon emission and comprehensive utilization of solid waste. The properties and applications of geopolymer concrete and coal gangue concrete are reviewed, and the basic properties of fly ash based geopolymer concrete with coal gangue coarse aggregate are deduced on this basis, and the suitable structure for construction engineering is put forward. The summary shows that the research on geopolymer concrete and coal gangue concrete mainly includes mix design, mechanical properties and durability of components, etc. has been relatively more, but the engineering application is less. There is no literature about fly ash based geopolymer concrete with coal gangue coarse aggregate, which needs to be paid more attention to, especially the application of suitable application in prefabricated reinforced truss concrete composite slab and light concrete filled steel tube column.

## Keywords

Fly Ash, Geopolymer, Coal Gangue Coarse Aggregate, Engineering Application

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

粉煤灰地质聚合物煤矸石粗骨料混凝土,是以粉煤灰基胶凝材料为粘结剂,取代硅酸盐水泥,以煤矸石粗骨料取代天然粗骨料,制成的一种绿色环保混凝土。粉煤灰基胶凝材料,是以粉煤灰、矿渣为原料,氢氧化钠、水玻璃等碱性溶液为激发剂,制备出的具有高抗压强度的粉煤灰基碱激发胶凝材料,是近年来发展起来的一种新型无机非金属材料,具有较高的强度、良好的耐久性能和耐化学腐蚀的性能。煤矸石是煤矿在建井、开采掘进、采煤和煤炭洗选过程中排出的含碳岩石及岩石,是煤矿建设、煤炭生产过程中所排放出的固体废弃物的总称。据不完全统计,目前我国煤矸石累计堆放超过 60 亿吨,形成煤矸石山 1500~1700 座,占地 20 余万亩,且以每年 5~7 亿吨的排放量逐年增加。因此,研究粉煤灰地质聚合物煤矸石粗骨料混凝土在量大面广的建筑工程中应用,对减少高能耗水泥的使用、推进固体废弃物资源化和建筑业可持续发展、解决日益凸显的混凝土材料严重匮乏问题、保护资源与环境意义重大。

本文将地质聚合物混凝土、煤矸石混凝土的研究与应用进行综述,探讨粉煤灰地质聚合物煤矸石粗骨料混凝土在建筑工程中应用的可行性。

## 2. 地质聚合物混凝土

我国对于地质聚合物混凝土的研究是从 21 世纪初开始的,具有广阔的应用前景。目前已有的研究方向及成果主要集中于地质聚合物混凝土的基本力学性能、增韧性、冲击力学性能、耐久性、组合构件等方面。

地质聚合物混凝土基本力学性能方面,学者们主要研究了配合比及养护条件等因素对强度的影响,如养护温度及时间、粉煤灰掺量、外加剂掺量、碱激发剂模数、骨料掺量、砂率等[1]-[7]对地质聚合物混凝土和易性、坍落度、抗压强度、抗折强度、劈拉强度、弹性模量、泊松比等基本力学性能的影响。地

质聚合物混凝土的胶凝材料通常以粉煤灰为主,另外偏高岭土和赤泥也可作为胶凝材料进行地质聚合物混凝土的制备[8][9][10]。此外,也常把矿渣粉等作为地质聚合物混凝土的外加剂,用以改善其力学性能。骨料方面,可利用废弃混凝土再生粗骨料、工业冶炼废渣、珊瑚骨料等[11][12][13][14][15]替代天然粗骨料,研究表明随着再生骨料含量的增高,地质聚合物混凝土的抗压强度、弹性模量和泊松比都逐渐降低。

由于地质聚合物具有脆性较大的缺点[16],因此增加地质聚合物混凝土的韧性成为了研究重点之一。研究表明通过向地质聚合物混凝土中添加玄武岩纤维、碳纤维、钢纤维、陶瓷纤维、PVA纤维、有机树脂、苯丙乳液等增韧材料[17]-[24],可使地质聚合物混凝土具有较好的增韧作用,但是随着纤维用量的增加,地质聚合物混凝土的抗压强度先上升后下降,因此存在一个最佳的纤维掺量。

地质聚合物混凝土冲击力学性能方面,学者们利用霍普金森压杆系统对其冲击力学性能进行了大量的研究[25]-[32],并提出了玄武岩纤维增强混凝土的动态本构模型[29]。同时也研究了地质聚合物混凝土在高温条件下[33][34][35][36][37]和进行动态劈裂拉伸试验时的吸能特性与损伤演化,并进行了声谱特性的小波包分析,也研究了其高应变率的动态压缩变形特性[38][39][40][41],研究结果表明地质聚合物混凝土具有较好的冲击力学性能和变形特性。

地质聚合物混凝土耐久性方面,研究了地质聚合物混凝土的耐海水侵蚀性能[20]、抗冻性、耐高温性能、抗碳化性、抗硫酸盐性能等[42][43][44][45][46],但是对于其耐久性的内部微观结构及损伤机理的研究尚少,因此可作为耐久性研究的一个重点研究方向。

对于地质聚合物混凝土构件应用方面的研究,由于地质聚合物混凝土具有抗收缩性能和抗碳化性能差的问题,因此部分学者将地质聚合物混凝土和钢管相结合形成了钢管地质聚合物混凝土,进行了圆钢管地质聚合物混凝土柱偏压性能研究和中空夹层钢管地质聚合物混凝土短柱的轴压性能研究[47][48]。另外,地质聚合物混凝土梁构件也开展了少量的研究,杨永民[49](2018)采用螺旋BFRP筋与地质聚合物混凝土组合制备了梁柱等构件,研究了基于BFRP筋增强地质聚合物混凝土梁构件的力学性能及其在海水环境下的时变规律,建立了海洋环境下BFRP筋增强地质聚合物混凝土构件服役寿命预测模型。刘杉[50](2019)通过三分点加载试验,对地质聚合物混凝土梁构件正截面抗弯和斜截面抗剪性能进行了研究。

上述表明:1)国内学者对地质聚合物混凝土的研究主要集中在材料宏观的力学性能方面,但是对去微观结构的相关研究以及改性机理方面研究涉及较少;2)对于地质聚合物混凝土的强度影响因素的研究已经比较成熟,但是制备工业主要是参考现有的混凝土的相关规范标准,尚且没有制定出地质聚合物混凝土的多种工业标准和试验规程;3)地质聚合物混凝土的成本远高于普通混凝土,制备流程也具有一定的复杂性,因此在降低其成本和简化制备流程的基础上保证其力学性能也是一个重要的研究方向。4)地质聚合物混凝土目前在我国大多是被用作修补材料,对于其他应用还较少,特别是基本构件方面,不论是组合构件还是地质聚合物混凝土构件,都存在很大的研究空白。

### 3. 煤矸石混凝土

目前我国对于煤矸石混凝土的研究较多,主要包括煤矸石混凝土基本力学性能、耐久性、基本构件及应用等。

煤矸石混凝土基本力学性能方面,学者们采用正交试验设计方法,研究了不同变量因素对煤矸石混凝土拌合物工作性及硬化强度的影响,如粉煤灰取代率、减水剂掺量、砂率、骨料吸水率、颗粒级配范围和粗集料体积含量等[51]-[56]。另外,在煤矸石混凝土中掺入钢纤维、聚乙烯醇(PVA)、聚丙烯(PP)等作为增强材料,研究了其硬化后的抗压强度、劈拉强度和抗折强度等宏观力学性能[57][58],也对其微观孔结构进行了研究[60]。研究结果表明,煤矸石集料可以代替天然集料制备出不同强度等级的混凝土,其

配制的混凝土性能优良, 不仅实现了固体废弃物的减排目标, 而且缓解了硬质石材短缺的问题, 具有双重效益[60]。

为了探讨煤矸石集料配制混凝土的耐久性, 从宏观和微观上对煤矸石集料混凝土进行了耐久性试验, 分析了经硫酸盐侵蚀后抗压强度损失值、渗透系数及其冻融后弹性模量损失值等指标[61] [62], 重点对煤矸石和普通碎石作为骨料分别制备混凝土试件进行对比分析[63] [64], 但对于煤矸石混凝土耐久性方面的研究还有待进一步深入。

煤矸石混凝土具有良好的塑性性能, 可用作建筑结构材料。钢管煤矸石混凝土构件方面, 大量学者[65] [66] [67] [68]对煤矸石钢管混凝土柱进行了轴压、偏压试验以研究其承载力, 并提出计算公式。张玉琢等[69](2022)通过 ABAQUS 建立圆钢管煤矸石混凝土轴压短柱有限元模型, 验证模型可靠性, 并研究试件的破坏模式、应力分布与荷载分配, 在此基础上分析试件在不同取代率下含钢率、钢材屈服强度、混凝土轴心抗压强度对钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力的影响。除了静力试验研究, 学者们[70] [71] [72]对钢管煤矸石混凝土加强环中柱节点、柱与钢梁连接节点—牛腿外加强环节点等, 在低周反复循环荷载作用下, 进行了节点的抗震性能试验研究和理论分析。同时, 也研究了钢管煤矸石混凝土受弯构件的受力过程, 确定了含钢率对承载力的影响[73]。大量研究表明, 煤矸石混凝土灌入钢管, 构成的钢管煤矸石混凝土组合材料在应用于建筑物构件中具有良好的性能。此外, 煤矸石混凝土楼板方面, 针对压型钢板-煤矸石砼组合楼板、新型煤矸石轻骨料轻钢密肋无梁楼盖、新型煤矸石轻质混凝土内墙板与外墙板、钢筋桁架-自燃煤矸石混凝土组合板等进行了研究, 并利用有限元分析软件对组合楼板进行了数值模拟分析[74]-[80]。煤矸石混凝土剪力墙方面, 田磊[81] (2013)在已有研究的基础上提出一种新型的组合剪力墙-带加劲肋钢板煤矸石混凝土剪力墙, 并用数值仿真模拟的方法对组合剪力墙的力学性能进行了分析, 初步验证了这种新型组合抗侧力构件在实际工程中应用的前景。煤矸石钢筋混凝土柱方面, 李永靖等[82] (2013)对煤矸石骨料钢筋混凝土柱的抗震性能进行了基础试验研究。

根据以上的研究表明, 煤矸石骨料钢筋混凝土应用在建筑结构上是完全可行的。煤矸石混凝土材料层面的研究主要集中于配合比设计、基本力学性能与耐久性方面, 但是煤矸石混凝土的内部微观结构的研究尚少。构件层面的研究主要是针对钢管煤矸石混凝土柱、煤矸石混凝土组合板等组合构件, 但是煤矸石混凝土构件的研究尚少, 需进一步推广研究。

## 4. 地质聚合物煤矸石粗骨料混凝土

目前我国对地质聚合物煤矸石粗骨料混凝土的研究涉及较少, 葛洁雅等[83] (2021)将原状和煅烧的煤矸石粗骨料分别按不同掺量替代碎石, 制备煤矸石粗骨料-地聚物混凝土, 分析了煤矸石掺入量、煅烧与否对混凝土 28d 抗压强度、抗氯离子渗透性能、抗冻性能的影响, 并探究混凝土性能指标之间的相关性、煤矸石粗骨料的合适掺量及其煅烧的必要性。因此, 地质聚合物煤矸石粗骨料混凝土还需要较多的关注, 特别是在配合比设计、结构构件力学性能等研究方面。

## 5. 地质聚合物煤矸石混凝土建筑工程应用

### 5.1. 预制装配式钢筋桁架叠合板

装配式建筑近年来得到了较多的政策支持, 取得了较快的发展。装配式建筑中, 一般都要采用混凝土楼板, 其中装配式钢结构中楼板混凝土用量占整个建筑的 80% 以上、装配式混凝土中楼板混凝土用量约占 30%~40%。装配式钢筋桁架混凝土叠合板(见图 1)是应用较多的一种形式, 《装配式混凝土建筑技术标准》GB51231-2016 中规定, 预制板部分厚度不小于 60 mm、现浇板部分不小于 50 mm。将粉煤灰基地质聚合物煤矸石混凝土应用于预制板部分具有可行性。具体分析如下:

1) 粉煤灰地质聚合物煤矸石混凝土在常温下强度不高, 一般能够达到 C30~C40, 但对于楼板用混凝土来说是足够的。并且具有早强、凝结速度快的特性, 在工厂化生产的条件下, 通过边拌合边浇筑的方式提高浇筑速度, 机械振捣提高密实度, 在自然养护条件下, 几小时能够实现拆模, 1 周内即可搬运, 如果蒸压养护, 则能够实现蒸压养护完成后即可搬运。从而实现了生产线的快速周转, 提高了生产效率。

2) 粉煤灰地质聚合物煤矸石混凝土在凝结硬化过程中存在微膨胀特性, 一般不会导致混凝土和钢筋的粘结破坏, 此时混凝土处于受压状态, 在施工现场完成预制板安装、浇筑混凝土时不易产生板底裂缝, 这是较普通混凝土预制板的优势之一。

3) 粉煤灰地质聚合物煤矸石混凝土含有较多的碱金属盐类并具有一定的碱性环境, 在使用过程中易与空气中的 CO<sub>2</sub> 发生反应产生表面泛碱不利于装饰的现象。可通过优化粉煤灰地质聚合物配合比、底部表面喷涂乳液隔绝空气、底部设置纤维水泥板等方式解决。其中, 底部设置纤维水泥板是一种较优的解决方案, 见图 2, 纤维水泥板以水泥为基本材料和胶黏剂, 以矿物纤维水泥和其它纤维为增强材料, 经制浆、成型、养护等工序而制成, 具有较好的表面平整度和抗拉韧性, 在工厂生产预制板时可作为免拆底膜, 在使用过程中能够有效的减少顶棚的开裂, 并能够实现免抹灰的效果, 从而节约装修成本。

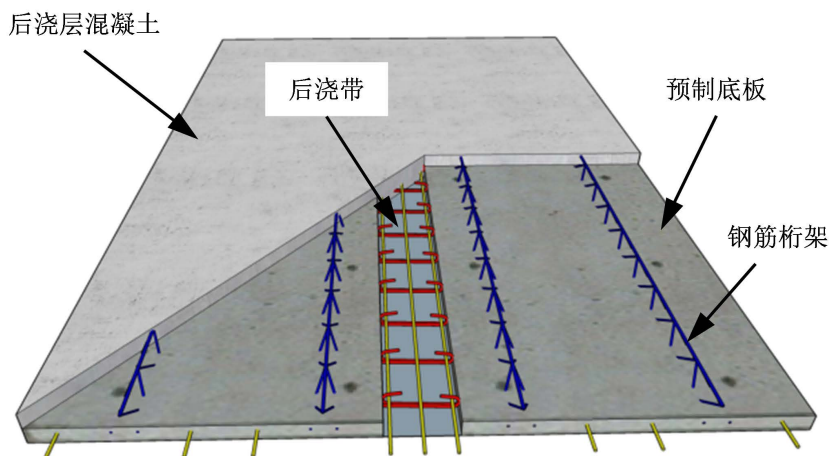


Figure 1. Prefabricated reinforced truss concrete composite slab construction  
图 1. 装配式钢筋桁架混凝土叠合板结构

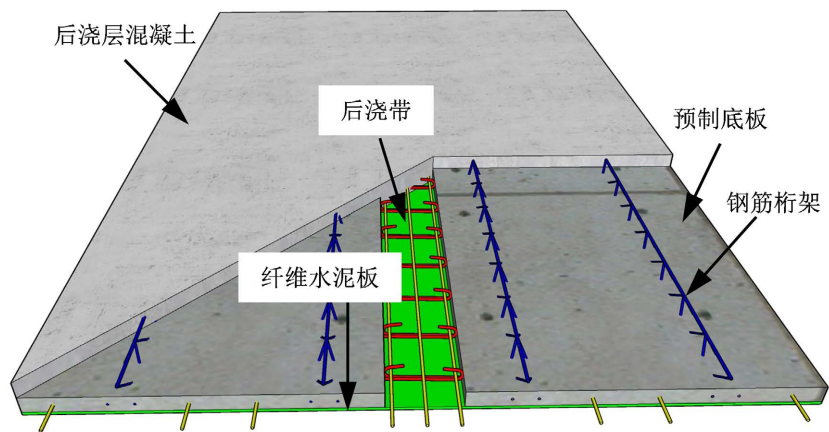


Figure 2. Prefabricated reinforced truss concrete composite slab construction with base plate  
图 2. 带底板装配式钢筋桁架混凝土叠合板结构

## 5.2. 轻型钢管混凝土

装配式建筑在城市多层和高层建筑中发展相对较快,然而,适于量大面广的村镇低层住宅的装配式结构体系的发展尚较慢。装配式低层住宅轻钢框架结构是一种适用于村镇住宅较优的结构形式,其柱一般为轻型钢管混凝土柱(壁厚一般小于4 mm),将粉煤灰地质聚合物煤矸石混凝土用于填充钢管具有较好的可行性,分析如下:

1) 在轻钢结构中,一般采用空钢管的结构形式,用钢量相对较高。在内部填充粉煤灰地质聚合物煤矸石轻骨料混凝土后,在受力上内填混凝土能够承担一定的压力,降低钢管应力,内填混凝土对钢管内壁起到侧向支撑的作用,提高了截面稳定性,一定程度上降低了钢材的用量。

2) 粉煤灰地质聚合物煤矸石轻骨料混凝土,相较于普通混凝土的导热系数显著降低,一定程度上能够提高保温效果,避免冷桥的出现,这对于寒冷地区村镇住宅,特别是因经济等原因不做保温层的住宅尤为重要。

3) 粉煤灰地质聚合物煤矸石轻骨料混凝土具有微膨胀特性,内填钢管后,能够有效的隔绝水汽,防止钢管内部锈蚀的产生,保证了钢材的耐久性。

## 6. 结论

通过对地聚物混凝土、煤矸石混凝土进行综述分析,从减少高能耗水泥使用并推进固体废弃物粉煤灰和煤矸石的资源化利用角度,得到以下结论:

1) 地质聚合物混凝土的研究主要集中在配合比设计、材料成分对其性能的影响、耐久性、钢-混凝土组合构件的力学性能等方面,但统一通用的较为简洁的地聚物混凝土配合比理论设计方法还需进一步完善,常温条件下配制出高强、高韧性的地聚物混凝土需亟待解决,同时,碱激发剂成本较高、混凝土制备工艺较为复杂、凝结速度较快等缺点也是限制其发展的重要因素。

2) 煤矸石混凝土的研究主要集中于将煤矸石替换天然骨料配制混凝土,后进行配合比的优化、力学性能探究、耐久性研究,将其应用于叠合结构、组合结构等方面,但对煤矸石混凝土的实际工程应用还较少,需对其进一步研究推广。

3) 关于将地聚物混凝土和煤矸石混凝土进行组合的粉煤灰地质聚合物煤矸石混凝土研究尚少,仍然需要较多的关注,特别是在配合比设计、结构构件力学性能等研究方面。

4) 尽管粉煤灰地质聚合物煤矸石混凝土具备可预计的不利条件,但通过优化施工工艺,理论上能够在装配式钢筋桁架混凝土叠合板、轻型钢管混凝土中进行适宜性应用。

## 基金项目

中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目(202106057),中国矿业大学(北京)本科教育教学改革与研究项目(J210608)。

## 参考文献

- [1] 谢子令,李显. 养护温度及时间对粉煤灰地质聚合物混凝土强度发展的影响[J]. 混凝土, 2014(6): 55-58.
- [2] 尹明,白洪涛,周吕. 粉煤灰地质聚合物混凝土的强度特性[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(10): 2723-2727.
- [3] 王谕贤,许金余,尹跃刚. 饱水地质聚合物混凝土基本力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 4237-4241.
- [4] 李昊宇. 粉煤灰地质聚合物混凝土受压力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [5] 孙庆巍,李昊宇,朱海洋. 基于响应面方法的粉煤灰地质聚合物混凝土制备[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 296-300.

- [6] 郑玮. 矿渣-粉煤灰基地聚合物混凝土快速修补水泥路面的材料配合比研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [7] 徐庆, 李秋, 陈伟, 等. 碱激发剂模数对地质聚合物透水混凝土的性能影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(11): 3575-3580+3586.
- [8] 徐延. 偏高岭土地聚合物混凝土抗冻性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [9] 张冰雪. 矿渣-粉煤灰/偏高岭土地聚合物再生混凝土轴压性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [10] 侯志辉. 赤泥地聚合物轻质混凝土制备技术及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- [11] 龙涛, 石膏爽, 王清远, 等. 粉煤灰基地聚合物再生混凝土的力学性能和微观结构[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(S1): 43-47.
- [12] 王翀昊. 矿渣-粉煤灰基地聚合物再生混凝土轴压性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [13] 张逸超, 陈星伊, 陈旭升, 等. 单轴受压地质聚合物再生混凝土损伤特性及本构模型研究[J/OL]. 硅酸盐通报, 1-8. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20220909.001>, 2022-09-09.
- [14] 李中顺. 固体废弃物在混凝土中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2017.
- [15] 吕邦成. 地质聚合物基珊瑚混凝土的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2019.
- [16] 朱晓敏. 粉煤灰地聚合物材料研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2005.
- [17] 许金余, 李为民, 王亚平, 等. 玄武岩纤维对不同胶凝材料混凝土的强韧化效应[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(3): 245-250.
- [18] 罗鑫, 许金余, 李为民. 纤维增强地质聚合物混凝土早期冲击力学性能的对比研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(10): 163-168+232-233.
- [19] 沈珂羽. 碳纤维改性粉煤灰-偏高岭土地聚合物混凝土的力学性能研究[J/OL]. 太原理工大学学报, 1-1. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1220.N.20220808.1212.002.html>, 2022-09-09.
- [20] 李圣. 有机树脂强化增韧偏高岭土-矿渣基地聚合物的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [21] 任韦波, 许金余, 白二雷. 地聚合物基陶瓷纤维混凝土高温性能的超声脉冲研究[J]. 混凝土, 2013(5): 31-34.
- [22] 王亚超. 碱激发粉煤灰基地聚合物强化增韧及耐久性能研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [23] 朱海洋. 钢纤维粉煤灰地质聚合物混凝土的力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [24] 万进一. 纤维增强地聚合物混凝土材料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [25] 许金余, 李为民, 范飞林, 等. 地质聚合物混凝土的冲击力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(1): 46-50+194.
- [26] 李为民, 许金余. 玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土的高应变率力学行为[J]. 复合材料学报, 2009, 26(2): 160-164.
- [27] 范飞林, 许金余, 李为民, 等. 矿渣-粉煤灰基地聚合物混凝土的冲击力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(5): 516-522.
- [28] 许金余, 李为民, 杨进勇, 等. 纤维增强地质聚合物混凝土的动态力学性能[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 127-132.
- [29] 许金余, 李为民, 黄小明, 等. 玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土的动态本构模型[J]. 工程力学, 2010, 27(4): 111-116.
- [30] 罗鑫, 许金余, 苏灏扬, 等. 冲击荷载下高流态地质聚合物混凝土的强度特性[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 72-77.
- [31] 白二雷, 许金余, 刘俊良. 早强地质聚合物混凝土 3h 动力学性能[J]. 材料导报, 2016, 30(S2): 429-431.
- [32] 叶奕隆. 地质聚合物再生混凝土冲击力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建工程学院, 2021.
- [33] 高志刚, 许金余, 白二雷. 温度对地质聚合物混凝土吸能特性的影响研究[J]. 混凝土, 2013(3): 10-13+17.
- [34] 任韦波, 许金余, 白二雷, 等. 高温后陶瓷纤维增强地聚合物混凝土性能与声学损伤的关系[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(3): 13-19.
- [35] 朱靖塞, 许金余, 罗鑫. 地质聚合物混凝土的高温损伤特性研究[J]. 混凝土, 2014(8): 8-10.

- [36] 王志坤, 许金余, 范建设, 等. 温度、应变率对地质聚合物混凝土抗压强度的影响[J]. 振动与冲击, 2014, 33(17): 197-202.
- [37] 王志坤, 许金余, 任韦波, 等. 高温下地聚合物混凝土损伤演化及动态本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 110-115.
- [38] 许金余, 罗鑫, 吴菲, 等. 地质聚合物混凝土动态劈裂拉伸破坏的吸能特性[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(5): 85-88.
- [39] 任韦波, 许金余, 张泽扬, 等. 高温后地质聚合物混凝土声谱特性的小波包分析[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(2): 284-290.
- [40] 罗鑫, 许金余, 苏灏扬, 等. 高流态地质聚合物混凝土的高应变率动态压缩变形特性[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(2): 216-222.
- [41] 白二雷, 许金余, 高志刚. 地质聚合物混凝土的变形特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(4): 80-83.
- [42] 李瑞文. 粉煤灰地聚合物混凝土力学性能及抗冻性研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [43] 许金余, 任韦波, 刘志群, 等. 高温后地质聚合物混凝土损伤特性试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(3): 265-270.
- [44] 黄琪, 石膏爽, 王清远, 等. 再生粗骨料对粉煤灰基地聚合物混凝土碳化性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(5): 1264-1269+1281.
- [45] 李健. 地聚合物混凝土受弯试件抗碳化耐久性性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [46] 唐灵, 张红恩, 黄琪, 等. 粉煤灰基地聚合物再生混凝土的抗硫酸盐性能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(S1): 164-170.
- [47] 杜亚成. 圆钢管无机聚合物混凝土柱偏压性能研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [48] 马雅杰. 中空夹层钢管地聚合物混凝土短柱轴压力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建工程学院, 2020.
- [49] 杨永民. 高抗海水侵蚀玄武岩纤维筋增强地质聚合物混凝土的研究与工程应用[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [50] 刘杉. 常温养护高强高抗碳化地聚合物混凝土研制及梁受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2019.
- [51] 周梅, 牟爽, 王强. 基于正交设计的大流动性自燃煤矸石全轻混凝土试验研究[J]. 非金属矿, 2012, 35(6): 19-22+48.
- [52] 王强. 自燃煤矸石粗集料特性对砂轻混凝土性能影响试验研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
- [53] 周梅, 王强, 牟爽. 自燃煤矸石粗集料特性对混凝土拌合物工作性影响研究[J]. 非金属矿, 2013, 36(1): 8-11.
- [54] 何政卿, 薛东杰, 胡白香, 等. 不同煤矸石替代率的生态混凝土性能试验研究[J]. 混凝土, 2013(5): 115-118+123.
- [55] 李永靖, 潘铖, 李东华, 等. 煤矸石掺再生骨料制备 C30 混凝土的试验研究[J]. 非金属矿, 2019, 42(2): 37-40.
- [56] 刘瀚卿, 白国良, 朱可凡, 等. 煤矸石粗骨料混凝土抗折强度试验研究[J/OL]. 建筑材料学报, 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20220727.0951.004.html>, 2022-09-09.
- [57] 周梅, 朱涵, 汪振双. 钢纤维增强自燃煤矸石轻集料混凝土试验研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(6): 715-720.
- [58] 杨秋宁, 景严谊, 张东生. 纤维及矿物掺合料对煤矸石混凝土力学性能的改性研究[J]. 功能材料, 2022, 53(7): 7150-7156.
- [59] 陈炜林. 煤矸石作为水泥混凝土骨料可行性的基础研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [60] 周梅, 白金婷, 薛忠泉. 自燃煤矸石全集料混凝土强度研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(S2): 200-202.
- [61] 张金喜, 陈炜林, 金珊珊, 等. 煤矸石集料混凝土耐久性研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(1): 116-125.
- [62] 郭金敏. 煤矸石混凝土耐久性的试验研究[J]. 混凝土, 2011(7): 56-58.
- [63] 李永靖, 张旭, 闫宣澎, 等. 测定煤矸石骨料混凝土性能的试验分析[J]. 非金属矿, 2013, 36(3): 43-45.
- [64] 李永靖, 邢洋, 张旭, 等. 煤矸石骨料混凝土的耐久性试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1215-1219.
- [65] 李帼昌, 刘之洋, 杨良志. 钢管煤矸石砼中核心砼的强度准则及本构关系[J]. 东北大学学报, 2002(1): 64-66.
- [66] 李帼昌, 钟善桐. 钢管约束下煤矸石混凝土的强度及横向变形系数[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002(3): 20-23.
- [67] 李帼昌, 段江侠. 钢管煤矸石砼偏压构件的承载力[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003(2): 202-204.
- [68] 张玉琢, 刘进隆, 徐倩. 钢管煤矸石混凝土轴压短柱极限承载力计算方法研究[J/OL]. 建筑科学与工程学报,



- 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1442.TU.20220225.0922.002.html>, 2022-09-09.
- [69] 张玉琢, 刘进隆, 徐倩, 等. 圆钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(4): 636-644.
- [70] 李帼昌, 孙巍, 邢忠华. 钢管煤矸石混凝土梁柱加强环中节点低周反复荷载试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008(2): 200-203.
- [71] 李帼昌, 刘麟, 邢忠华. 牛腿外加强环-钢管煤矸石混凝土柱与钢梁节点的试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008(3): 407-410.
- [72] 方晨. 钢管煤矸石砼柱-煤矸石砼梁连接节点的力学性能分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2013.
- [73] 李帼昌, 王兆强, 邵玉梅. 钢管煤矸石混凝土受弯构件的承载力分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005(6): 654-657.
- [74] 李帼昌, 常春, 曲曠胜. 压型钢板-煤矸石砼组合楼板的力学性能[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003(1): 61-63.
- [75] 李朝辉. 压型钢板-煤矸石轻骨料混凝土组合楼板的有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- [76] 刁鹏展. 煤矸石轻骨料混凝土楼板在钢结构住宅中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- [77] 赵培兰. 钢结构住宅中煤矸石轻骨料混凝土内墙板系的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [78] 孙泉. 钢结构住宅中煤矸石轻骨料混凝土外墙板系的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [79] 牛恒茂. 在钢结构住宅中煤矸石轻骨料混凝土楼板体系的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [80] 王庆贺, 刘雨婷, 许迪舜. 钢筋桁架-自燃煤矸石混凝土组合板受弯性能研究[J/OL]. 工业建筑, 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2068.TU.20220620.0943.002.html>, 2022-09-09.
- [81] 田磊. 往复荷载下带加劲肋钢板煤矸石砼剪力墙的力学性能分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2013.
- [82] 李永靖, 闫宣澎, 张旭, 等. 煤矸石骨料钢筋混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 1006-1011.
- [83] 葛洁雅, 朱红光, 李宗徽. 煤矸石粗骨料-地聚物混凝土的力学与耐久性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 218-223.