

粉煤灰作为混凝土掺合料的研究综述

薛山¹, 刘思萱², 孙博瑞¹

¹塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔

²辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新

收稿日期: 2022年3月25日; 录用日期: 2022年4月14日; 发布日期: 2022年4月25日

摘要

面对现代工业迅速发展的环境, 工业建筑大量被建起, 水泥的需求量也随之大幅增加, 在最近的研究中, 将粉煤灰作为掺合料, 应用在工业建筑方面, 成为了既经济又高效的解决方案。研究表明, 粉煤灰的掺入对混凝土提高力学性能有一定的影响, 还对耐久性能的改善起到作用, 还可以延长混凝土在复杂土壤条件以及极端天然气候下的服役时间。因此, 合理地将粉煤灰作为水泥基复合材料应用于建筑行业中, 对行业的可持续发展起着重要的影响。

关键词

粉煤灰, 混凝土, 可持续

Summary of Research on Fly Ash as Concrete Admixture

Shan Xue¹, Sixuan Liu², Borui Sun¹

¹School of Water Conservancy and Architectural Engineering, Tarim University, Alar Xinjiang

²School of Mapping and Geography Science, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning

Received: Mar. 25th, 2022; accepted: Apr. 14th, 2022; published: Apr. 25th, 2022

Abstract

In the face of the rapid development of modern industry, a large number of industrial buildings have been built, and the demand for cement has also increased significantly. In recent research, the application of fly ash as an admixture in industrial buildings has become an economic and efficient solution. The research shows that the addition of fly ash has a certain impact on the improvement of mechanical properties of concrete, plays a role in the improvement of durability, and can also prolong the service time of concrete under complex soil conditions and extreme nat-

ural climates. Therefore, the reasonable application of fly ash as cement-based composites in the construction industry plays an important role in the sustainable development of the industry.

Keywords

Fly Ash, Concrete, Sustainable

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

随着国家的发展,工业建筑的需求和基础设施活动的增加,近年来水泥的消耗量大幅增加,水泥行业面临这种增加的需求会出现短缺的情况,并且水泥制造业所产生的温室气体每年可达 13.5 亿吨,约占人类温室气体排放总量的 7%。与此同时,火电厂一直在产生大量的粉煤灰,这些粉煤灰没有得到妥善的利用,大多数情况下都当作工业废料来处理,这给固体废物管理带来了巨大的负担。因此,一方面由于建筑行业对水泥的需求急剧增加,人们对水泥制造行业的二氧化碳排放量感到非常担忧,另一方面,从环境的角度来看,粉煤灰的产生及其处理是一个紧迫的问题。结合这两点现状,国内外学者通过研究发现,粉煤灰的掺入可以对混凝土的强度有所提高,对制作过程中水化热起到降低作用,由于其化学成分的特性,还可以激发减水剂的减水效果,减少了工业用水,并且其填充作用可以使混凝土内部结构密实,将粉煤灰合理地应用于建筑行业,使粉煤灰在混凝土中充分地发挥其性能特点,这对水泥制造业带来的环境污染以及处理工业废料来说,即减少了自然资源和能源的使用又降低了水泥工业向大气中排放的温室气体,从而保护了环境。

2. 国内外研究进展

由于粉煤灰价格便宜、容易获得、并且富含二氧化硅和氧化铝等,因此作为最常用的水泥基复合材料。在过去的几年中,国内外学者提出了多种掺粉煤灰混凝土的配合比进行试验研究,观察其对混凝土各项性能的影响。

2.1. 粉煤灰作为水泥基复合材料对混凝土力学性能的影响

赵小明[1]等同时在混凝土中掺入纤维和粉煤灰,在冻融循环的侵蚀环境下,测量侵蚀过后试件的强度变化,选择质量损失率和相对动弹性模量等参数进行分析,研究粉煤灰和纤维比例对混凝土的影响,找出对混凝土性能有所提升的比例。Soroushian [2]等研究了通过加大代替混凝土的粉煤灰掺量对混凝土的影响,但是一直没有找到合适的掺量,经过总结后得出,只有在不需要早期抗压强度时,才能用较大掺量的粉煤灰来替代水泥应用于建筑物当中。后续由 Malhotra [3]等对他们的结果进行了深入探索后得出,当大掺量的粉煤灰替代水泥后,与素混凝土相比其内部结构明显有所改善,混凝土内部孔隙率明显降低,因此得到混凝土的力学性能有所提升。孟振亚[4]等经过试验得出,若是掺入矿物质较多,则会影响混凝土的抗冻性能降低,同时对于混凝土内部毛细管吸附率也有影响,抗压强度减小,但是掺入大量矿物质后,测量试件的抗冻性发现有所改善,以及抗氯离子侵蚀得到了提升。

Padhye [5]等研究较大掺量的粉煤灰和各种高强度混凝土(C30, 40, 50)进行试验研究,各个养护龄期下,不同粉煤灰掺量混凝土的抗压强度,结果发现,当粉煤灰替代率大于 40%时,抗压强度反而减少,特别是在初期,如果粉煤灰与高强度水泥混合,则粉煤灰的掺量可以提升至 40%往上。粉煤灰的掺量越大生

产混凝土的成本将会越低,在满足工程安全条件下,为建筑工程提供经济又安全的替代方案。冉星仕[6]等将粉煤灰和聚酯纤维分别掺入混凝土当中,来探究这两种物质对混凝土力学性能的影响,由单掺粉煤灰试验得出当粉煤灰掺量达到15%时对于抗压强度提升较大,随后掺量增加试件的强度反而有所降低,双掺后结合了两种物质的优点使得混凝土试件的力学性能大大提升。

唐加俊[7]等将粉煤灰、大理石粉和硅粉两两结合的掺入模袋混凝土当中,测量每种掺和物的力学性能,以及对试件内部的微观孔隙结构进行观察,得出掺合料影响变化规律。同时模拟模袋混凝土实际的服役环境,制定合理的干湿-冻融循环制度,研究对模袋混凝土耐久性及其微观孔隙在干湿-冻融循环耦合作用下的影响,得到更适合河套灌区模袋混凝土衬砌的优化配合比,为模袋混凝土在内蒙古河套灌区乃至北方地区推广应用奠定基础。魏毅萌[8]等认为将废弃混凝土变废为宝再次赋予其新的使用价值,是一个有利于环境保护的重要研究课题。从废弃的混凝土中提取出可以循环利用的骨料,再将这些骨料拌制在新的混凝土中能够产生新的混凝土材料,这种材料被称为再生骨料混凝土。郑大轩[9]等选取了粉煤灰的等级和掺量作为研究目标,对试块开展抗压强度测试发现试件的强度变化随着粉煤灰掺量以10%梯度增加出现了先上升后降低的变化形式,最大抗压强度对应的粉煤灰掺量是10%,在三个养护龄期均达到了最大,同时发现当粉煤灰掺量大于30%时试件的强度要低于基准试件,对比不同粉煤灰等级强度数据发现,I级粉煤灰给混凝土强度带来的提升要明显高于II级粉煤灰。

综上所述,适量粉煤灰作为混凝土掺合料对混凝土力学性能带来一定的提升,主要是由于粉煤灰的填充效应起到重要作用,混凝土试件在制作过程中其内部是存在很多孔隙的,粉煤灰掺入后可以对孔隙进行有效的填充,使得混凝土试件更加的密实,提高混凝土的整体性,在掺入粉煤灰的基础上选择等级高的粉煤灰,其细度模数会低,起到的填充效果会越好,在掺入粉煤灰的基础之上再加入其他具有优秀性能的掺合料,使多种掺合料共同发挥特性,来提升粉煤灰的综合性能,合理的应用于建筑工程当中,为建筑行业提供科学的参考。

2.2. 粉煤灰作为水泥基复合材料对耐久性能的影响

王腾蛟[10]等开展了将不同纳米纤维掺量(0.1%~0.5%)混凝土的碳化试验和冻融循环试验,从微观方面观察试件内部结构变化分析纳米纤维对混凝土腐蚀劣化机理的影响。王春生[11]等发现水工混凝土耐久性能在建筑物结构中起着重要的作用,因此针对水工混凝土耐久性方面提出了加强方案。根据Davis[12]研究了粉煤灰在混凝土管道制造中的潜力和优点,发现掺入粉煤灰后的混凝土渗透性有所减少,这是在混凝土管道中很重要的。对混凝土抗侵蚀有一定的提高,更为重要的是提高了混凝土的强度,使其拥有更长的服役时间,减少了更换的需要。徐存东[13]等对西北地区特殊的寒旱区混凝土结构受损等问题开展模拟试验,侵蚀溶液选取了3%浓度的NaCl和5%浓度的 Na_2SO_4 这两种典型的盐溶液进行腐蚀试验,以及制作清水组进行对比,测量受侵蚀试件的抗压强度以及选取质量损失和相对动弹性模量等参数,用损伤都来进行描述试件破坏程度,结合盐冻破坏的强度数据制作力学性能衰变模型,并且采用单因素变量的方式进行验证。孙昊月[14]等研究发现现役建筑物发生侵蚀破坏,结构性能下降,这在安全性和耐久性方面造成严重的影响,其原因主要是各种盐类对建筑物的不断侵蚀,以及天然气后造成的冻融循环所引起的。汪飞[15]等得出混凝土建筑物的设计年薪和服役年限受盐侵蚀和冻融循环影响较为严重,学者们认为是土壤中的氯离子起到主要作用。当水泥与水相结合时,温度会增加,从而导致混凝土的温度升高,Koo[16]等研究发现将粉煤灰掺入混凝土当中会降低混凝土混合物中水的需求,从而减少这种温度升高的现象,尤其是在大体积混凝土中,试验对比了煤灰掺量分别为20%和25%的试件,发现当粉煤灰掺量为25%时产生的热量更少,但是粉煤灰的火山灰效应就会变慢,可能会延迟混凝土的凝结时间。张雷[17]等认为目前针对混凝土耐久性问题国内外已有大量研究,但对盐沼泽地区混凝土腐蚀问题的研究结果与

观点至今仍未统一。在西部寒旱地区盐沼泽环境下,高矿化度的地表水、地下水及盐渍化土形成复合盐类强腐蚀环境,且存在干湿循环和冻融循环的耦合作用,因而西部地区混凝土结构的耐久性问题显得尤为复杂,还需要深入研究。李小山[18]等认为我国西北地区盐渍土现象较为严重,同时还有早晚温差大的环境,盐渍土中以硫酸盐为主,该地区的建筑物受侵蚀情况较为普遍。学者们认为掺入一定掺量的粉煤灰混凝土可以满足实际工程中的耐久性以及承载能力方面的要求,并且能够降低碳排放,节约能源。因此,研究粉煤灰混凝土在冻融循环与硫酸盐溶液耦合作用下的耐久性具有较为重要的科研价值和实际意义,本文主要对粉煤灰混凝土耐久性进行了以下研究。孙明[19]等开展了掺粉煤灰混凝土碳化试验和受氯离子侵蚀试验,研究发现混凝土内部的碳酸钙含量是随着粉煤灰掺量的增多逐渐减小,其主要原因是粉煤灰的火山灰效应,随着粉煤灰掺量的增加,再混凝土内部消耗的氢氧化钙也会增加,从而导致碳酸钙的减少,混凝土氯离子侵蚀试验得出粉煤灰的掺入导致氯离子峰值向混凝土内部迁移,这主要是由于粉煤灰混凝土较密实,可以阻止氯离子在试件在是扩散。

高立[20]等对 PVA 纤维长度进行控制开展再生混凝土抗冻性试验,从而得出适量的 PVA 纤维的掺入,可以使再生混凝土的抗冻性能有所改善,最佳纤维长度为 6 mm,最佳掺量为 2%。王娇[21]等经过试验得出试验初期,在硫酸盐侵蚀环境下,水工混凝土受冻融循环造成的破坏较小,对混凝土抗冻性能有所改善,随着时间推移,反而对试件造成破坏的作用明显加大。在硫酸盐和冻融循环共同侵蚀下,试件的整体性能降低,试件表面逐渐变得粗糙,试验证明水胶比为 0.33 的试件组耐久性能最优。安嘉伟[22]等认为适量的聚乙烯醇(PVA)纤维对混凝土的抗冻性能有所改善,通过试验发现,在同样的侵蚀环境下纤维混凝土的相对动弹性模量,下降速率更慢。在侵蚀条件相同时,掺纤维混凝土的耐久性更优秀,在普通混凝土相对动弹性模量下降超过 40%时,纤维混凝土经历了 2 倍的循环次数,相对动弹性模量下降也未达到 20%。王怀才[23]等指出了关于混凝土在盐蚀环境下进行冻融循环试验会存在的问题,并且给出指导性的建议和方法,对于混凝土受盐蚀和冻融侵蚀而导致劣化的耐久性问题进行了总结分析。董波[24]等为研究粉煤灰掺量对混凝土抗冻性能的影响经试验得到:1) 掺粉煤灰混凝土试件的质量损失速度,随着冻融循环次数的增多,速率会加快。2) 研究了粉煤灰掺量的变化对混凝土试件质量的影响发现,少量粉煤灰掺入后对质量不会造成什么影响,而掺量超过 24%之后就会使得质量迅速的降低,对应着试件被破坏的速度也被加快。3) 研究粉煤灰作为变量混凝土试件的相对动弹性模量发现,动弹模量的变化受到粉煤灰掺量多少的影响,当掺量较少时,动弹性模量出现上升,且在掺量为 20%时达到了最大,而掺量较多时动弹性模量反而会降低。肖林凯[25]等认为由于材料的内部受到交替变化的正负温差产生的内部力会导致结构劣化,而纳米混凝土有抑制材料内部微裂缝的产生和扩展等特点,纳米混凝土的抗冻性能是本文研究的重点。结合二者做出试验得对同一种混凝土分别掺加不同纳米材料以及不同质量分数所得的试验结果进行对比分析,根据结果研究分析冻融条件下纳米混凝土的衰减规律。从而得出掺有纳米混凝土试件有助于提高混凝土性能。侯铁军[26]等对掺粉煤灰混凝土冻融性质进行研究,结果发现试件在养护达到 60 天之后粉煤灰掺量为 30%的混凝土相对动弹模量在冻融循环 60~80 次时处于较高值,对抗冻性能有一定的提升。

综上所述,粉适量粉煤灰作为混凝土掺合料对混凝土耐久性能有所改善,学者们通过对粉煤灰混凝土试件开展碳化试验、抗氯离子侵蚀试验、冻融循环试验、干湿循环试验、抗渗性试验等,结果表面粉煤灰的填充效应的火山灰效应是混凝土耐久性能提高的重要因素之一,且随着试件养护时间的增长,火山灰效应起到的效果就越明显,混凝土耐久性能提高得越显著。

3. 结论

本文对粉煤灰作为水泥基掺合料对混凝土试件的力学性能及耐久性能的研究现状进行总结分析,经过各位国内外学者的试验研究得出:

- 1) 粉煤灰掺量对于低强度混凝土来说不宜过多, 会影响混凝土早期的力学性能, 大掺量混凝土适用于对早期强度要求不高的高强度混凝土。
- 2) 将适量的粉煤灰替代部分水泥制作混凝土, 对混凝土的耐久性有明显的提升。
- 3) 粉煤灰作为混凝土掺合料其填充效应和火山灰效应发挥较大的作用, 为绿色建筑工程提供科学依据。

参考文献

- [1] 赵小明, 李奥阳, 乔宏霞, 李江川, 王新科. 纤维混凝土抗冻性能及损伤劣化模型研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3196-3202.
- [2] Soroushian, P. and Ghebrab, T. (2013) Field Investigation of High-Volume Fly Ash Pavement Concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, **73**, 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.006>
- [3] Malhotra, V.M., Carette, G.G., Bilodeau, A. and Sivasundaram, V. (1991) Some Aspects of Durability of High-Volume ASTM Class F (Low-Calcium) Fly Ash Concrete. *Special Publication*, **126**, 65-83.
- [4] 孟振亚, 张守治. 大掺量矿物掺合料混凝土抗冻相关性研究[J]. 广东建材, 2019, 35(9): 16-19+23.
- [5] Padhye, R.D. and Deo, N.S. (2016) Cement Replacement by Fly Ash in Concrete. *International Journal of Engineering Research*, **5**, 60-62.
- [6] 冉星仕. 双掺粉煤灰和聚酯纤维对混凝土力学性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34(6): 121-124.
- [7] 唐加俊. 干湿-冻融循环作用下模袋混凝土的耐久性及其孔结构试验研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [8] 魏毅萌. 冻融循环作用下再生骨料混凝土的宏-微观损伤机理试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [9] 郑大轩, 李洁文, 郭文彪. 粉煤灰品质及掺量对混凝土性能影响试验研究[J]. 当代化工, 2021, 50(2): 262-265. <https://doi.org/10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2021.02.003>
- [10] 王腾蛟, 许金余, 彭光, 孟博旭. 纳米碳纤维增强混凝土耐久性试验[J]. 功能材料, 2019, 50(11): 11114-11121.
- [11] 王春生. 水工混凝土结构耐久性研究[J]. 农业科技与信息, 2019(17): 98-99.
- [12] Davis, R.E. (1954) Pozzolanic Materials with Special Reference to Their Use in Concrete Pipe. Technical Memo, American Concrete Pipe Association, Irving.
- [13] 徐存东, 李振, 朱兴林, 姚志鹏, 王铭岩, 张鹏. 盐冻侵蚀作用下混凝土力学性能变化研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 132-136.
- [14] 孙昊月, 宿晓萍, 王晓鹏. 不同盐类环境下普通混凝土的抗盐冻耐久性研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2016, 17(3): 10-15.
- [15] 汪飞. 盐蚀-冻融-荷载耦合作用下混凝土的损伤研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [16] Koo, K.M., Kim, G.Y., Yoo, J.K. and Lee, E.B. (2014) Properties of Adiabatic Temperature Rise on Concrete Considering Cement Content and Setting Time. *India Journal of Engineering & Materials Science*, **21**, 527-535.
- [17] 张雷. 德令哈盐沼区桥梁墩台混凝土损伤试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [18] 李小山. 冻融循环与硫酸盐溶液耦合作用下混凝土力学性能宏-微观试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [19] 孙明, 鲍麒, 丁贵军, 张鹏, 孙丛涛. 粉煤灰对混凝土碳化及氯离子侵蚀规律的影响[J]. 公路, 2021, 66(8): 295-299.
- [20] 高立, 朱方之, 左工, 李泽良. PVA 纤维再生混凝土配合比设计及抗冻性能试验研究[J]. 建材技术与应用, 2019(4): 18-21.
- [21] 王娇. 基于冻融循环与硫酸盐侵蚀耦合作用的水工混凝土耐久性试验研究[J]. 水利规划与设计, 2019(8): 82-85.
- [22] 安嘉伟, 赵建军, 刘曙光, 闫长旺, 白茹, 徐勇彪. 聚乙烯醇纤维对混凝土抗冻性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(7): 51-54.
- [23] 王怀才, 杨建波, 余圣爱, 倪志军, 王丽静. 冻融盐蚀作用对混凝土耐久性影响研究进展[J]. 青海交通科技, 2019(3): 118-121.

- [24] 董波. 粉煤灰掺量对混凝土抗冻性能的影响规律研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2018(3): 47-49+58.
- [25] 肖林凯. 纳米混凝土冻融循环作用下的损伤模型研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳大学, 2018.
- [26] 侯铁军. 粉煤灰掺量对混凝土冻融性质的影响研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2019(3): 33-36.