

分类号:
学 号:

单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



级配与改性方法对炉渣砂浆力学性能影响的研究

学 位 申 请 人	李芳生
指 导 教 师	但建明教授
申请学位门类级别	工学硕士
学 科、专 业 名 称	化学工程与技术
研 究 方 向	绿色建材
所 在 学 院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

分类号:

密 级: 请注明密级及保密期限

分类号：
学 号：20222007071

单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



级配与改性方法对炉渣砂浆力学性能影响的研究

学 位 申 请 人	李芳生
指 导 教 师	但建明教授
申请学位门类级别	工学硕士
学 科、专 业 名 称	化学工程与技术
研 究 方 向	绿色建材
所 在 学 院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

Study on properties of slag mortar by gradation and modification method

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Li Fang-sheng

(Green Building Material)

Dissertation Supervisor: Prof. Dan Jian-ming

April, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：李芳生

时间： 2026 年 5 月 20 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：李芳生

时间： 2026 年 5 月 20 日

导师签名：但建明

时间： 2026 年 5 月 20 日

摘要

中国是燃煤发电大国，燃煤发电容量约 12.6 亿千瓦，占总发电装机容量比重 43.8%，发电量占比 65%左右，每年产生约 2 亿吨的燃煤电厂炉渣（简称炉渣），多采用堆放和掩埋处理，既占地又破坏环境。同时，我国庞大的基建发展面临天然砂日趋枯竭现状。若用燃煤电厂炉渣部分或完全替代天然砂生产水泥砂浆或混凝土，即循环利用了炉渣，同时又解决了天然砂的短缺问题。理化测试分析表明，炉渣有替代天然砂做骨料的潜力。但炉渣直接做砂浆骨料时，存在孔隙率高、吸水量大、压碎值高、强度低、针片状比例高等缺陷。

针对炉渣细骨料存在的缺陷，论文采用破碎、科学级配和添加外加剂，以及利用炉渣粉-水泥-电石渣-芒硝低碳胶凝材料来包覆炉渣的方法，克服炉渣细骨料的缺陷，提升炉渣砂浆力学性能。此外，为简化炉渣预处理工艺和降低炉渣砂浆生产成本，以超细粉煤灰-水泥复合粉末为填充-胶凝增强材料，采用干法搅拌填充炉渣孔隙，再加水搅拌提高胶凝填充材料粘性，防止填充料脱落，再生产砂浆。研究结果表明：

(1) 燃煤电厂炉渣相较于天然砂，其主要成分为二氧化硅、氧化铁、氧化铝和氧化钙，在物理性质方面，4.75-2.36mm 的炉渣的压碎值为 29.63%，吸水率为 3.54%，密度为 2224kg/m³。天然砂压碎值为 4.38%，吸水率为 2.97%，密度为 2657kg/m³。燃煤电厂的炉渣属于轻质骨料，其本身的性质对炉渣砂浆影响性能最大的为压碎值与密度，通过级配的方式优化炉渣砂浆的性能。

(2) 研究炉渣细度模数和替换率对砂浆性能的影响，结果显示，细度模数降低利于提高炉渣替换率，但过低会因炉渣比表面积增加致用水量上升，降低砂浆抗压和抗折强度。最佳炉渣细度模数为 2.08。当炉渣不同粒径按 4.75-2.36mm 占比为 10%，2.36-1.18mm 占比 5%，1.18-0.60mm 占比为 10%，0.60-0.30mm 占比为 55%，0.30-0.15mm 占比为 7%，0.15-0.075mm 占比为 3.25%和 0.075mm 以下占比为 9.75%以后，砂浆用水量显著降低 19.75%；100%替换时，抗压强度比天然砂砂浆低 10.10%。合理的模数和替换率克服了炉渣压碎值高对抗压强度的负面影响。

(3) 为提升炉渣砂浆抗压强度，研究掺加减水剂提高炉渣砂浆抗压强度。研究结果表明，添加水泥质量 1%的聚羧酸和萘系减水剂，炉渣砂浆抗压强度分别提升 55.96%、38.10%；对孔隙结构分析发现，用聚羧酸减水剂，炉渣砂浆孔隙率增加 5.48%；用萘系减水剂，孔隙率降低 9.67%。分别添加 50%的矿粉、粉煤灰外掺物，砂浆 28d 抗压强度相较于天然砂砂浆分别提升 38.34%和 37.76%。与天然砂石料相比，抗压强度是提高了还是降低？用粉煤灰完全替代炉渣细粉，炉渣砂浆 28d 抗压强度相较于天然砂砂浆提升 16.32%。

(4) 使用矿粉占 40%、炉渣占 22%、微硅粉占 1.71%、电石渣占 33.18%和芒硝占 3%，使用炉渣质量 60%的包覆材料对炉渣进行包覆，常温养护 7d。将包覆后的炉渣引入炉渣砂浆，相较于天然砂砂浆，28d 抗压强度低 7.93%。对包覆好的炉渣进行预饱和水处理后，与天然砂砂浆相比，28d 抗压强度低 4.63%。

(5) 在砂浆的验证实验中，研究外掺物添加形式，研究表明，采用外掺物先与炉渣搅拌，再和

水泥搅拌的方法，能显著改善炉渣砂浆性能。具体而言，外掺量为 10%时，抗压提升 7.04%；外掺量为 20%时，抗压强度提升 12.50%；外掺量为 30%时，抗压强度提升 21.10%。外掺物先与炉渣预拌，可有效堵塞炉渣孔隙，降低其吸水性，增强颗粒强度，减少进入炉渣孔隙的水泥量。使用水泥质量 10%的炉渣细粉，与按特定比例（2.36-4.75mm 占 10.00%、1.18-2.36mm 占 5.00%、0.60-1.18mm 占 10.00%、0.30-0.60mm 占 55.00%、0.15-0.30mm 占 7.00%、0.075-0.15mm 占 3.25%、0.075mm 以下占 9.75%）的炉渣先预搅拌，再添加水泥与水制备的炉渣砂浆，其性能与天然砂砂浆一致。

关键词：炉渣砂浆；级配方式；外加剂；外掺物；改性方法

Abstract

China is a major country in coal-fired power generation, with a coal-fired power generation capacity of approximately 1.26 billion kilowatts, accounting for 43.8% of the total power generation installed capacity, and generating about 65% of the total electricity. Each year, approximately 200 million tons of coal-fired power plant slag (referred to as slag) are produced. Most of it is disposed of by stacking and burial, which not only occupies land but also damages the environment. At the same time, China's vast infrastructure development is facing the situation where natural sand is increasingly depleted. If coal-fired power plant slag is partially or completely used as a substitute for natural sand to produce cement mortar or concrete, it will not only recycle the slag but also solve the shortage of natural sand. Chemical testing and analysis show that slag has the potential to replace natural sand as a raw material. However, when slag is directly used as a mortar aggregate, there are defects such as high porosity, high water absorption, high crushing value, low strength, and high proportion of needle-like and flaky particles.

To address the defects of slag fine aggregates, the paper adopts methods such as crushing, scientific gradation, adding admixtures, and using low-carbon cementitious materials composed of slag powder, cement, calcium carbide slag, and mirabilite to encapsulate the slag to overcome the defects of slag fine aggregates and improve the mechanical properties of slag mortar. In addition, to simplify the pre-treatment process of slag and reduce the production cost of slag mortar, a dry-mixing filler and cement composite powder as a filling and cementitious reinforcing material is used. The pores of the slag are filled with dry-mixing, and then water is added for stirring to increase the viscosity of the cementitious filling material to prevent the filler from falling off, and then the mortar is produced. The research results show:

(1) Compared with natural sand, the main components of coal-fired power plant slag are silicon dioxide, iron oxide, aluminum oxide and calcium oxide. In terms of physical properties, the crushing value of the slag with a particle size of 4.75 - 2.36mm is 29.63%, the water absorption rate is 3.54%, and the density is 2224 kg/m³. The crushing value of natural sand is 4.38%, the water absorption rate is 2.97%, and the density is 2657 kg/m³. The slag from coal-fired power plants is a lightweight aggregate. The properties of the slag itself have the greatest impact on the performance of slag mortar, and the crushing value and density through the grading method can be optimized to improve the performance of the slag mortar.

(2) The study investigated the influence of the fineness modulus of slag and the replacement rate on the performance of mortar. The results showed that a lower fineness modulus was beneficial for increasing the slag replacement rate, but too low a value would cause an increase in water usage due to the increase in the specific surface area of slag, thereby reducing the compressive and flexural strengths of the mortar. The optimal fineness modulus of slag was 2.08. When the different particle sizes of slag were proportioned as 4.75-2.36mm accounting for 10%, 2.36-1.18mm accounting for 5%, 1.18-0.60mm accounting for 10%, 0.60-0.30mm accounting for 55%, 0.30-0.15mm accounting for 7%, 0.15-0.075mm accounting for 3.25%,

and 0.075mm and below accounting for 9.75%, the water usage of the mortar significantly decreased by 19.75%; when 100% of slag was replaced, the compressive strength was 10.10% lower than that of the natural sand mortar. Reasonable fineness modulus and replacement rate overcame the negative impact of high crushing value of slag on compressive strength.

(3) To enhance the compressive strength of slag mortar, the study investigated the effect of adding water-reducing agents to increase the compressive strength of slag mortar. The research results showed that when 1% of the cement mass was added with polycarboxylate and naphthalene-based water-reducing agents, the compressive strength of the slag mortar increased by 55.96% and 38.10% respectively; the analysis of the pore structure revealed that using polycarboxylate water-reducing agents, the porosity of the slag mortar increased by 5.48%; using naphthalene-based water-reducing agents, the porosity decreased by 9.67%. Adding 50% of mineral powder and fly ash admixtures respectively, the 28-day compressive strength of the mortar was increased by 38.34% and 37.76% compared to the natural sand mortar. Compared with the natural sand and stone materials, did the compressive strength increase or decrease? When fly ash completely replaces the fine slag powder, the 28-day compressive strength of the slag mortar is increased by 16.32% compared to the natural sand mortar.

(4) Using 40% fly ash, 22% slag, 1.71% microsilica powder, 33.18% calcium carbide slag, and 3% anhydrite, a coating material with a slag mass fraction of 60% was used to coat the slag. The slag was cured at room temperature for 7 days. The coated slag was introduced into slag mortar. Compared with natural sand mortar, the 28-day compressive strength was 7.93% lower. After pre-saturation with water and pre-treatment of the coated slag, compared with natural sand mortar, the 28-day compressive strength was 4.63% lower.

(5) In the verification experiments of the mortar, the addition forms of the admixtures were studied. The research showed that by first mixing the admixtures with the slag and then mixing it with the cement, the performance of the slag mortar could be significantly improved. Specifically, when the admixture content was 10%, the compressive strength increased by 7.04%; when the admixture content was 20%, the compressive strength increased by 12.50%; when the admixture content was 30%, the compressive strength increased by 21.10%. By pre-mixing the admixtures with the slag, it could effectively block the pores of the slag, reduce its water absorption, enhance the particle strength, and reduce the amount of cement entering the slag pores. Using 10% of the slag fine powder with the same quality as cement, and pre-mixing it with the slag in a specific proportion (2.36-4.75mm accounted for 10.00%, 1.18-2.36mm accounted for 5.00%, 0.60-1.18mm accounted for 10.00%, 0.30-0.60mm accounted for 55.00%, 0.15-0.30mm accounted for 7.00%, 0.075-0.15mm accounted for 3.25%, and 0.075mm and below accounted for 9.75%), and then adding it to the mortar prepared by mixing cement and water, the performance of the mortar was consistent with that of the natural sand mortar.

Key words: Slag mortar; Gradation Method; Admixture; Additive; Modification Method

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 燃煤电厂炉渣的来源.....	1
1.3 燃煤电厂炉渣作为砂浆中细骨料的研究现状.....	2
1.4 外加剂与外掺物在砂浆中的应用.....	5
1.5 当前研究中存在的问题.....	7
1.6 研究内容与技术路线.....	8
1.7 研究思路.....	9
第 2 章 原材料与方法.....	10
2.1 实验原材料.....	10
2.2 外加剂.....	12
2.3 实验仪器及制备方法.....	12
2.4 性能测试方法.....	14
2.5 表征测试方法.....	16
第 3 章 不同级配方式的炉渣骨料替换天然砂骨料对砂浆性能的影响.....	17
3.1 细度模数对炉渣砂浆力学性能的影响.....	17
3.2 0.60 mm 以下炉渣级配方式的研究.....	23
3.3 4.75-0.60mm 细骨料炉渣替换天然砂对砂浆的影响.....	31
3.4 0.60-2.36mm 炉渣替换 0.30-0.60mm 炉渣对砂浆的影响.....	37
3.5 本章小结.....	40
第 4 章 炉渣砂浆性能的改性研究.....	41
4.1 引言.....	41
4.2 外加剂对炉渣砂浆的影响.....	41
4.3 外加剂与炉渣对砂浆孔隙结构的影响.....	60
4.4 炉渣与减水剂对砂浆体积干缩的影响.....	67
4.5 外掺物对炉渣砂浆性能的影响.....	70
4.6 细骨料炉渣预饱水处理对砂浆的影响.....	80
4.7 本章小结.....	86
第 5 章 炉渣包覆处理对砂浆试块的影响与砂浆验证实验.....	88

5.1 引言	88
5.2 包覆材料配比的设计	88
5.3 炉渣的包覆厚度对炉渣颗粒性能的影响	91
5.4 包覆后的炉渣对砂浆试块的影响	99
5.5 砂浆的验证实验	100
5.6 本章小结	103
第 6 章 结论与展望	105
6.1 结论	105
6.2 展望	108
参考文献	109
作者简介	118

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

混凝土和砂浆是现代工程与工业化建设中使用的建筑材料^[1,2]，是楼房建设、道路铺设和水利工程等项目中的主要建筑原料。天然砂在混凝土与砂浆中作为细集料的作用。由于近些年的基建建设，消耗了大量的天然砂，造成天然砂资源短缺，价格由 2010 年时的 15 元/吨上涨至 2025 年的 111 元/吨^[3]。导致许多砂场为了利润无序开采和禁采河段开采造成了严重的生态环境破坏。中国政府在《关于促进砂石行业健康有序发展的指导意见》^[4]中要求按照规定采砂，并且寻找天然砂石料的替代物。

中国本身是工业大国，每年会产生 41.1 亿吨的工业固废^[5]，很多学者^[6-9]探究使用工业固废作为砂浆与混凝土中天然砂的替代物例如使用电弧炉渣^[7,9]、珊瑚骨料^[10]、富铁矿渣^[11]、钢渣^[12,13]和炉渣^[14,15]等作为部分替换天然砂的材料。中国是燃煤发电大国，虽然我国发电正逐渐向新能源转型，但燃煤发电仍是电力主要来源。燃煤发电厂每年产生大量需处理的炉渣，炉渣颗粒化学性质稳定且有一定力学性能。炉渣一般通过生产建筑材料和环保处理方法，其中环保处理方法以填埋法为主，但是会占用大量土地资源，且炉渣中的有害物质可能会渗出，污染土壤和地下水，作为建筑材料时，作为轻质骨料、水泥混合材料和墙体材料为主。从环保与利用率上来看，炉渣作为骨料其对环境的影响最小，但是炉渣本身的高压碎值和吸水率对炉渣砂浆性能产生负面影响。通过级配^[16,17]、外加剂^[18,19]和外掺物^[20]等方式减少与天然砂砂浆性能的差距。

随着我国的经济发展，快速发展的经济需要维持和建设公路网，中国现存公路里程为 535 万公里，到 2035 年，公路里程增加 16.2 万公里^[21]。道路材料需求极大，长期基建使天然砂年需求量约 200 亿吨。因开采天然砂成本低、利润高，在利益驱使下，各地出现滥采、超采及禁采区违规开采等情况，导致河道阻塞、地质与生态破坏，还影响水利工程。如今河砂资源渐趋枯竭，产量难满足国家建设需求，价格日益上涨。基于可持续发展战略，急需找到能大量替代天然砂、供应稳定且满足设计要求的骨料。

1.2 燃煤电厂炉渣的来源

燃煤发电厂在发电时，会产生炉渣、脱硫灰和粉煤灰等固废^[22]，其中炉渣主要分为干排炉渣与湿排炉渣，干排炉渣是指采用空气对高温炉渣进行冷却，将炉渣在干燥状态排出系统。湿排渣是指通过水力除渣系统将炉渣从锅炉中排出，并通过渣沟、渣池等设备进行输送和处理的方式。

1.3 燃煤电厂炉渣作为砂浆中细骨料的研究现状

1.3.1 砂浆中骨料定义

砂浆主要由骨料、水泥、外掺物和外加剂等组成，其中骨料在砂浆中质量占比最高，通常质量占比达到 60%以上，骨料在砂浆和混凝土中作为骨架和填充作用的粒状材料。骨料本身对砂浆性能影响显著。其中骨料的种类^[23-25]、骨料本身的物理性^[26-29]、骨料本身的化学性质^[28, 30]和骨料的形貌^[31-33]等因素都会对砂浆的性能造成影响。

(1) 骨料种类对砂浆性能的影响

骨料种类的不同会导致其在物理性质、化学性质和骨料形貌上有较大的差异，造成砂浆性能改变。闫亚楠等^[23]将砂岩、大理石、玄武岩和正长岩四种骨料制成砂浆。实验在未进行级配控制、水胶比和砂率不变的情况下，结果显示：大理石混凝土早期抗压强度略高于砂岩混凝土；玄武岩混凝土最终抗压强度最高，原因是大理石骨料级配合理、石粉含量适中，所以早期抗压强度较高，但玄武岩压碎值在四种骨料中最低，使得其最终强度在四种骨料砂浆里最高。此外，正长岩弹性模量最低、极限拉伸值最高，故正长岩骨料混凝土抗裂性最佳。

Muhammad Aslam^[24]研究使用粗油棕锅熟料（OPBC）和油棕壳（OPS）制作轻质高强度混凝土，由于 OPS 的比重低于 OPBS 的比重，所以使用 OPS 替换 OPBC 来降低混凝土的密度。测试结果表明，OPS 在提升混凝土延性性能贡献了 60%，随着 OPS 替换 OPBC 的替换率增加，会导致其用水量增加，显著降低其抗压强度、弯曲强度和弹性模量。

使用不同种类的骨料，由于其多方面的原因都会造成其对砂浆和混凝土造成不同程度的影响，其中骨料的密度、压碎值和形貌上是最显著影响砂浆和混凝土的性能的方面。

(2) 骨料物理性质对砂浆性能的影响

在混凝土和砂浆中，骨料的物理性质会对砂浆造成显著的影响，其中不同的骨料之间在物理性质上差距显著，例如骨料的压碎值、比重、孔隙率和堆积密度等方面。Lidiane Fernanda Jochem^[26]通过研究混凝土再生骨料（RCA）、轻骨料（LWA）和天然硅质砂（NS）制备砂浆，研究表明多孔骨料的使用有助于骨料与水泥膏的致密化，从而改善了 ITZ，多孔骨料在饱和后通过铅封装，降低了释放水的速度，增加了水化热和机械强度，它有助于改善砂浆的水化作用，从而没有降低最终的性能。

学者 C. Muñoz-Ruiperez^[27]通过膨胀黏土和再生骨料，研究回收骨料个体密度对砂浆性能的影响。结果显示，随着膨胀黏土加入，它与再生骨料形成薄膜，使骨料内部空气增多，密度逐渐降低；再生骨料本身密度低于天然砂骨料。随着回收骨料加入砂浆，用水量增加。在力学性能方面，因用水量增加，轻质骨料的砂浆性能逐渐下降。

(3) 骨料化学性质对砂浆性能的影响

部分骨料在加入砂浆和混凝土后会提供水泥水化不同的化学反应条件,所产生的条件不同程度会影响砂浆的性能。学者 Puput Risdanareni^[28]使用碱活化轻质骨料(LWA)制作可自愈砂浆,研究表明LWA可以提供高初始PH值作为内固化剂,促进营养细胞在湿循环固化30天后,可以完全愈合宽度为0.3-0.4mm的裂纹,在较晚的年龄仍然活跃样品的愈合性能有所提高。

(4) 骨料形貌对砂浆性能的影响

砂浆骨料的形貌会对砂浆的工作性能、孔隙率、强度以及耐久性等产生影响。一般来说,骨料越圆润,就越有益于砂浆性能;反之,若骨料不圆润,则不利于砂浆性能的发展。Xiaobing He^[31]通过用石灰石砂、辉绿岩砂和天然河砂研究形貌因子对砂浆流变性与和易性的影响。研究提出由长宽比和宽高比构成的形貌指标k能反映砂粒杆状和平整度,以砂体积分数V作级配砂形态指标kc的权重,采用综合级配砂形态影响因子 λ 评价级配砂粒对砂浆形态和数量的影响。调整 λ 可提升砂浆流变性能与工作性。研究显示,当形貌影响因子 λ 处于0.86-1.08时,新鲜砂浆屈服应力低、塑性粘度高,能保证良好流动性且不分离。Junqing Wu^[34]通过对骨料的球形、平整度、伸长率和角度指数等形貌特征进行了统计分析。结果表明骨料松散填料的孔隙率随骨料球度的增大而减小,并随成角度指数的增大而增大。球形度对骨料松散填料孔隙率的影响约为角度指数的5倍。

学者 H.L. Wang^[32]研究探讨了钢渣骨料形态变化与路面磨损层抗滑性能的关系。钢渣表面粗糙,附着大量微小颗粒,有不同尺寸孔隙,钢板条表面更粗糙,且接触点和峰更尖锐,这或许能提供更多附着力及长效抗滑性能。学者 Tian Li^[33]从形状、角度、表面纹理三个不同尺度对细骨料形貌进行定量描述。研究发现,细骨料形态对砂浆流变性影响显著,且该影响可归结于填料密度、比表面积和等效直径的耦合效应。

1.3.2 砂浆中骨料级配的机理与方法

在砂浆里,改变骨料在不同粒径范围的分布,就能改变水泥砂浆性能。这会显著影响砂浆的流动性^[17,35]、用水量^[36]、力学性能^[36]、和孔隙结构^[37]。对于密度小于天然砂的骨料,常通过改变其级配,低成本提高替换后砂浆的性能。

Weishuo Yan^[35]经对骨料级配和砂浆流变学展开研究,实验结果显示,相较于小骨料,大骨料更易沉降,且沉降速度随骨料尺寸增大而加快。此外,塑性粘度对骨料分布影响较小,不过砂浆的塑性粘度越高,骨料的沉降速度就越低。Tian Li^[17]通过改变球形玻璃珠的级配方式,能够有效改善砂浆的流动性。在相关研究中采用了非均匀系数、曲率系数和堆积密度等指标。实验结果表明,连续骨料的分级可用非均匀系数进行适度定量;细骨料的分级会对流动性和堆积密度产生影响,非均匀系数降低时,堆积密度的增益效果增强,反之,非均匀系数升高时,堆积密度的增益效果减弱。

王宁^[36]研究以单因素实验法用炉渣制混凝土,探讨燃煤颗粒物理性质、骨料粒径对混凝土物理性能影响。结果显示:炉渣颗粒替换率增加,混凝土坍落度下降;燃煤炉渣替换天然砂后,混凝土吸水率和孔隙率升、质量与密度降;不同骨料粒径的燃煤炉渣混凝土,强度随粒径增大而减、吸水率上升。

Zheng Pan^[37]研究水饱和和固化条件下,骨料级配对人造砂集料(MSA)砂浆孔隙结构及分形特性的影响,用Talbot分级理论量化MSA分级。MSA砂浆中颗粒吸附水为主,自由水和弱结合水含量低。Talbot指数为0.4时,骨料级配均匀,细骨料能均匀填充粗骨料间,总表面积与比表面积适宜,界面过渡区(ITZ)小孔隙多。骨料级配越均匀,渗透率越小,粗细骨料充填减少水渗透通道。此外,孔隙率和孔隙分布也影响渗透性。

1.3.3 轻质骨料在砂浆中的应用

近年来,轻质骨料在砂浆与混凝土中应用渐多,其制备的砂浆与混凝土具质量低、可设计性强的优势。不同种类轻质骨料的物理性质^[29,38]和化学性质^[39]各异,对砂浆和混凝土性能影响程度不同。

冯冠翔^[40]研究不同轻质骨料对混凝土物理性能影响,选用碎石形粉煤灰陶粒、圆球形粉煤灰陶粒、EPS颗粒和SAP颗粒。这四种骨料在堆积密度、筒压强度和吸水率方面各有特性。不同种类骨料混凝土抗压强度排序为:圆球形陶粒混凝土>碎石形陶粒混凝土>SAP混凝土>EPS混凝土。陶粒混凝土破坏形式为脆性破坏,EPS混凝土和SAP混凝土呈韧性破坏。比重低的骨料适合匹配更低强度等级的水泥石基体。

张培恒^[41]采用单因素实验研究、正交实验图像处理等方法,分析再生骨料(RCA)级配、RCA体积率、水灰比、泡沫掺量和聚丙烯纤维对再生骨料轻质混凝土(RCALC)制备过程及性能的影响。结果显示,调整级配能改善RCALC性能与施工便利性;RCA体积率30%时,既能保证试样正常浇筑,又能提升抗压强度;水灰比增大,泡沫混凝土基体流动度线性增大、干密度降低、吸水率先降后升、抗压强度先升后降。

1.3.4 炉渣作为骨料在砂浆与混凝土中的应用

王宁^[36]在使用炉渣制备混凝土的研究里,炉渣混凝土的坍落度、质量及力学性能随替换率上升而下降,炉渣粒径越大,对混凝土负面影响越大,炉渣最佳替换率为5%。张嘉琛^[42]用CFB飞灰与机制砂配制的混凝土后期强度有轻微倒缩,提高养护温度也无法解决。用CFB炉渣作集料,改善了混凝土抗氯离子渗透、抗碳化腐蚀性能,使其具备优异的抗硫酸盐侵蚀性能。张跃宏^[43]在煤气化炉渣用于砂浆骨料的研究中,发现90d前,炉渣砂浆抗压和抗折强度低于天然砂砂浆。与28d龄期相比,90d、180d龄期试样抗压强度分别提高6.0%、15.0%,抗折强度分别提高17.9%、24.9%。陈鹏^[44]在CFB灰

渣干粉砂浆的研究中,发现随着 CFB 炉渣粒径增大,砂浆的用水量和稠度损失出现增大的趋势,而砂浆的保水率呈现出下降的趋势。外加剂的掺量适当时,能够改善 CFB 灰渣干粉抹灰砂浆的性能。李姗姗^[45]对 CFB 炉渣细骨料对砂浆干燥收缩特性进行研究,结果表明,随 CFB 炉渣取代量增加,砂浆的干燥收缩呈先降低后增加,10%的 CFB 炉渣掺量使砂浆达到最小的收缩值,降低 1%。56d 时,20%、30%掺量的 CFB 炉渣较掺量为 0 的砂浆增大 23%、30%。由于 CFB 炉渣起到集料填充作用,填充空隙,提高了砂浆的密实度,约束了砂浆的干燥收缩变形,随着 CFB 炉渣掺量的增加,因其自身疏松多孔的特性,使密实度降低,失水收缩较大。

1.4 外加剂与外掺物在砂浆中的应用

1.4.1 减水剂的应用现状

减水剂是砂浆重要组成部分。在工作性上,能有效改善砂浆流动性,减少泌水和离析^[46],提升稳定性与均匀性^[47];力学性能方面,可提高抗压和抗折强度^[48];耐久性方面,能降低渗透性、增强抗冻性、改善抗化学侵蚀性^[49,50];收缩性能方面,可减少干缩并影响干缩机制^[51];微观结构方面,能改变孔隙结构、影响水化产物。

Haosheng Ge^[18]通过研究木质素磺酸钠(LS)、萘高效减水剂(PNS)、脂肪族高效减水剂(HSB)以及两种聚羧酸盐高效增塑剂(PCEs)对砂浆总干燥收缩和自体收缩的影响发现:水泥浆流动性对 PCE 剂量变化最为敏感,其次是 PNS 和 HSB 剂量,增加 LS 用量对水泥浆流动性影响较小。不同类型减水剂对砂浆体积收缩的影响机制存在差异,在混凝土工程领域,PCE 作为减水剂可有效降低整体干燥收缩。

张建^[52]研究了新型聚羧酸减水剂 SR-PCA 的作用效果,其能使砂浆裂缝面积、最大裂缝宽度和平均裂缝宽度分别减少 55%、48%和 50%。SR-PCA 增大了 C-S-H 微观孔比例,利于提升水泥基材料耐久性;降低介孔比例,有助于减少水泥基材料收缩变形。它通过降低表面张力、增强孔溶液粘度,缓解毛细管负压发展,减少塑性收缩开裂。荀武举^[53]研究指出,聚羧酸减水剂侧链接枝密度降低时分子量逐渐增加,引入超长侧链聚羧酸系减水剂可提高水泥砂浆剪切应力,利于形成致密水泥石结构,让硬化混凝土孔结构及孔径分布更细化。另外,机制砂混凝土孔隙率随砂率增加而降低,无害孔径情况远优于河砂混凝土。

Haoliang Huang^[54]研究了聚羧酸减水剂(PCE)改善混凝土微观组织及对混凝土耐久性的影响,PCE 混凝土的碳化深度、水渗透深度和氯化物渗透性越小,说明 PCE 混凝土比 PNS 混凝土具有更好的耐久性。PCE 砂浆的孔隙率更低,临界孔径更小,与 PNS