

高炉矿渣粉对水泥基材料性能的影响研究

李 磊

北京华宏工程咨询有限公司，北京

收稿日期：2025年3月30日；录用日期：2025年4月21日；发布日期：2025年5月7日

摘 要

本研究旨在深入探究高炉矿渣粉对水泥基材料性能的影响。通过一系列实验，对不同高炉矿渣粉掺量的水泥基材料的工作性能、力学性能和耐久性进行了测试分析。结果表明，适量掺加高炉矿渣粉可改善水泥基材料的工作性能，提高其流动性；在一定掺量范围内，早期强度虽有所降低，但后期强度增长显著，且能满足特定水泥强度等级要求；同时，还能有效提升水泥基材料的耐久性。本研究为高炉矿渣粉在水泥基材料中的合理应用提供了重要依据。

关键词

高炉矿渣粉，水泥基材料，工作性能，力学性能，耐久性

Study on Effect of Blast Furnace Slag Powder on Properties of Cement-Based Materials

Lei Li

Beijing Huahong Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing

Received: Mar. 30th, 2025; accepted: Apr. 21st, 2025; published: May 7th, 2025

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of blast furnace slag powder on the properties of cement-based materials. Through a series of experiments, the working performance, mechanical properties and durability of cement-based materials with different blast furnace slag contents were tested and analyzed. The results show that the working performance and fluidity of cement-based materials can be improved by adding the proper amount of blast furnace slag powder. In a certain dosage range, the early strength decreased, but the late strength increased significantly, and can meet the requirements of specific cement strength grades; At the same time, it can also effectively

improve the durability of cement-based materials. This study provides an important basis for the reasonable application of blast furnace slag powder in cement-based materials.

Keywords

Blast Furnace Slag Powder, Cement-Based Materials, Working Performance, Mechanical Properties, Durability

Copyright © 2025 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

水泥基材料作为土木工程建设中应用最为广泛的建筑材料之一，在各类基础设施建设，如道路、桥梁、建筑等领域发挥着至关重要的作用。然而，传统水泥生产过程中伴随着大量的能源消耗与二氧化碳排放，对环境造成了巨大压力。据相关数据统计，全球工业二氧化碳排放量的 7%~10%源自水泥行业[1]-[3]，这与当前全球倡导的低碳环保发展理念相悖。

高炉矿渣是钢铁冶炼过程中的主要副产品，其产量巨大。若能将高炉矿渣粉作为水泥替代材料应用于水泥基材料中[4]-[8]，不仅可以有效解决矿渣的堆放问题，减少对环境的污染，还能显著降低水泥生产过程中的二氧化碳排放，实现资源的循环利用，具有重要的环境效益和经济效益。

国内外众多学者对高炉矿渣粉在水泥基材料中的应用展开了广泛研究[9]-[13]。在工作性能方面，已有研究表明高炉矿渣粉的掺入能够改善水泥浆体的流动性。这主要是因为高炉矿渣粉颗粒较细，且形状较为规则，能够在水泥浆体中起到滚珠轴承的作用，减少颗粒间的摩擦阻力，从而提高浆体的流动性。

在力学性能方面，一般认为适量的高炉矿渣粉替代水泥，早期由于其活性较低，会使水泥基材料强度增长缓慢，但后期随着矿渣粉的水化反应逐渐充分，强度会有较大幅度的提升。例如，有研究发现当高炉矿渣粉掺量在 30%左右时，早期强度可能会降低 10%~20%，但 28 天之后强度增长明显，甚至可能超过基准水泥的强度。

在耐久性方面，高炉矿渣粉的掺入可以改善水泥基材料的微观结构，提高其抗渗性、抗冻性等耐久性指标。这是因为矿渣粉的二次水化反应消耗了水泥水化产生的氢氧化钙，生成了更多的凝胶状物质，填充了孔隙，使结构更加致密。

尽管已有诸多研究成果，但目前对于高炉矿渣粉在不同环境条件下，特别是复杂侵蚀环境中对水泥基材料性能的长期影响研究还不够深入，不同研究之间的结论也存在一定差异，需要进一步的研究加以明确。

本研究旨在系统地研究高炉矿渣粉对水泥基材料性能的影响，通过全面测试不同掺量高炉矿渣粉的水泥基材料的工作性能、力学性能和耐久性，深入分析其影响规律，并探讨其作用机理。研究成果可为高炉矿渣粉在水泥基材料中的科学合理应用提供理论依据和技术支持，有助于推动绿色环保型水泥基材料的发展，促进建筑行业的可持续发展。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

本实验选用的水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，其各项性能指标均符合国家标准 GB17-2007 的要

求，具有良好的稳定性和代表性。

高炉矿渣粉由钢铁厂提供，其比表面积为 $450\text{ m}^2/\text{kg}$ ，主要化学成分如表 1 所示。高炉矿渣粉的主要成分包括 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等，这些成分决定了其潜在的活性和性能。

Table 1. Main parameters of blast furnace slag powder

表 1. 高炉矿渣粉主要参数指标

化学组成	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	其他
质量分数(%)	40.5	32.0	12.5	8.0	1.5	1.0	4.5

实验用砂为标准石英砂，其级配良好，含泥量低于 0.5%，符合实验要求。石英砂的颗粒形状和大小均匀，能够保证实验结果的准确性和可比性。

外加剂选用聚羧酸高性能减水剂，减水率为 25%，用于调节水泥基材料的工作性能，确保实验过程中用水量的合理控制。

2.2. 实验配合比设计

本实验设计了 6 组不同高炉矿渣粉掺量的水泥基材料配合比，分别为 0% (基准组，记为 S0)、10% (S10)、20% (S20)、30% (S30)、40% (S40)、50% (S50)，具体配合比如表 2 所示。在设计配合比时，保持水胶比为 0.5，水泥与砂的质量比为 1:3，通过调整高炉矿渣粉和水泥的比例来实现不同掺量的设计。

Table 2. Mix ratio of cement-based materials with different slag powder content of blast furnace

表 2. 不同高炉矿渣粉掺量的水泥基材料配合比

编号	水泥(kg)	高炉矿渣粉(kg)	砂(kg)	水(kg)	减水剂(kg)
S0	450	0	1350	225	1.125
S10	405	45	1350	225	1.125
S20	360	90	1350	225	1.125
S30	315	135	1350	225	1.125
S40	270	180	1350	225	1.125
S50	225	225	1350	225	1.125

2.3. 实验方法

2.3.1. 工作性能测试

工作性能测试主要包括坍落度和扩展度测试，依据 GB/T 50080-2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行。将按照配合比搅拌好的水泥基材料拌合物分三层装入坍落度筒内，每层用捣棒插捣 25 次，然后垂直提起坍落度筒，测量拌合物的坍落度值和扩展度值，以评估其流动性和工作性能。

2.3.2. 力学性能测试

力学性能测试包括抗压强度和抗折强度测试。抗压强度测试依据 GB/T 17671-1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》进行。将成型好的 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 的水泥胶砂试件在标准养护条件下养护至规定龄期(3 天、7 天、28 天)后，在压力试验机上进行抗压强度测试，记录破坏荷载并计算抗压强度。

抗折强度测试同样在标准养护至规定龄期后，使用抗折试验机对试件进行加载，记录破坏荷载并计算抗折强度。

2.3.3. 耐久性测试

抗渗性测试采用渗水高度法，依据 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行。将尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm 的混凝土试件在标准养护 28 天后，装入抗渗仪中，以 0.1 MPa 的水压开始试验，以后每隔 8 h 增加水压 0.1 MPa，直至 6 个试件中有 3 个试件表面出现渗水现象时，停止试验，记录此时的水压，并测量试件的渗水高度，以评估其抗渗性能。

抗冻性测试采用快冻法，依据 GB/T 50082-2009 进行。将尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的混凝土试件在标准养护 28 天后，放入冻融试验机中，按照规定的冻融循环制度进行冻融循环试验，每 25 次循环测试一次试件的动弹性模量和质量损失，当动弹性模量下降至初始值的 60%或质量损失超过 5%时，停止试验，记录冻融循环次数，以评估其抗冻性能。

3. 结果及分析

3.1. 工作性能结果分析

不同高炉矿渣粉掺量水泥基材料的坍落度和扩展度测试结果如图 1 所示。

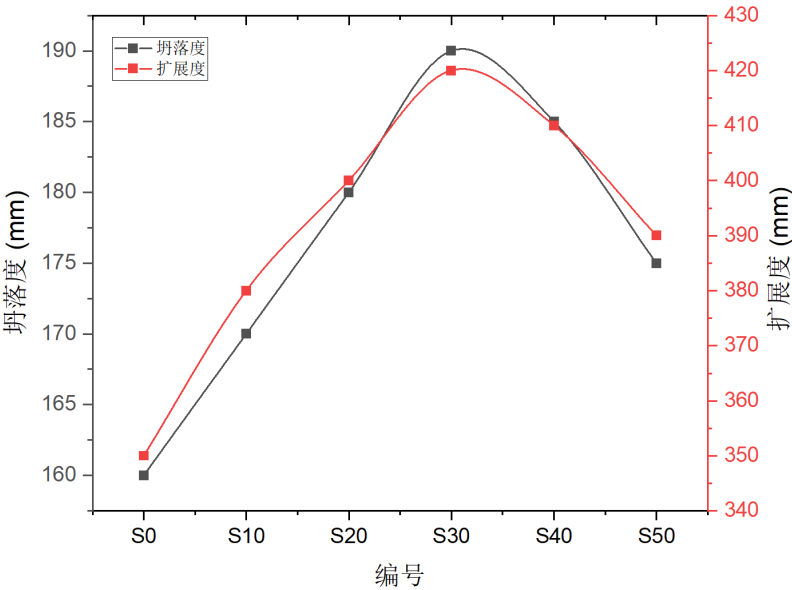


Figure 1. Test results of slump and expansion of cement-based materials with different blast-furnace slag content
图 1. 不同高炉矿渣粉掺量水泥基材料的坍落度和扩展度测试结果

从图 1 数据可以看出，随着高炉矿渣粉掺量的增加，水泥基材料的坍落度和扩展度呈现先增大后减小的趋势。在掺量为 30% 时，坍落度和扩展度达到最大值，分别为 190 mm 和 420 mm。这是因为高炉矿渣粉颗粒较细，比表面积较大，在水泥浆体中能够起到分散和润滑的作用，增加了浆体的流动性。同时，矿渣粉的球状颗粒形态也有助于减少颗粒间的摩擦阻力，进一步提高流动性。然而，当掺量超过 30% 后，由于矿渣粉的需水量相对较大，过多的矿渣粉会吸收更多的水分，导致浆体的流动性下降。

3.2. 力学性能结果分析

3.2.1. 抗压强度

不同高炉矿渣粉掺量水泥基材料在不同龄期的抗压强度测试结果如图 2 所示。

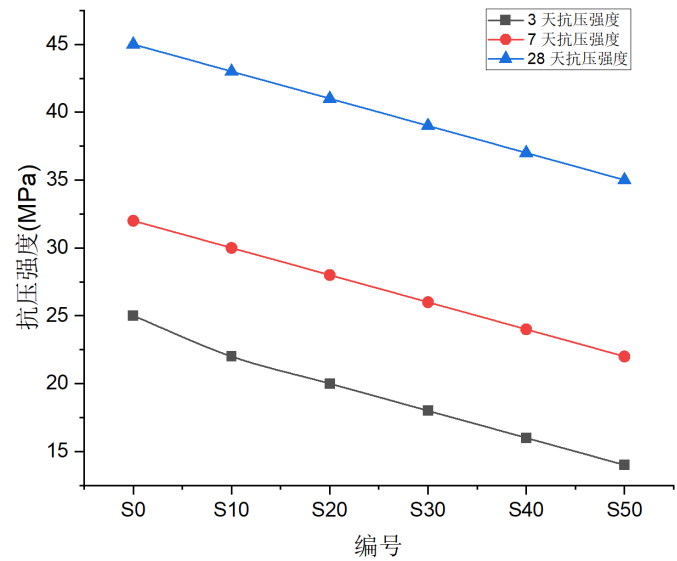


Figure 2. Compressive strength of cement-based materials with different blast furnace slag content at different ages
图 2. 不同高炉矿渣粉掺量水泥基材料在不同龄期的抗压强度

由图 2 数据可知,随着高炉矿渣粉掺量的增加,水泥基材料的早期(3 天、7 天)抗压强度逐渐降低。这是因为高炉矿渣粉的活性低于水泥,在早期水化过程中,其参与反应的程度较低,对强度的贡献较小。然而,从 28 天抗压强度数据来看,虽然强度仍随着掺量的增加而降低,但降低幅度逐渐减小。当掺量为 50% 时,28 天抗压强度仍能达到 35 MPa,满足一定的工程使用要求。并且,随着龄期的延长,掺加高炉矿渣粉的水泥基材料强度增长明显,这是由于后期矿渣粉的水化反应逐渐充分,生成了更多的水化产物,填充了孔隙,增强了结构的密实度,从而提高了强度。

3.2.2. 抗折强度

不同高炉矿渣粉掺量水泥基材料在不同龄期的抗折强度测试结果如图 3 所示。

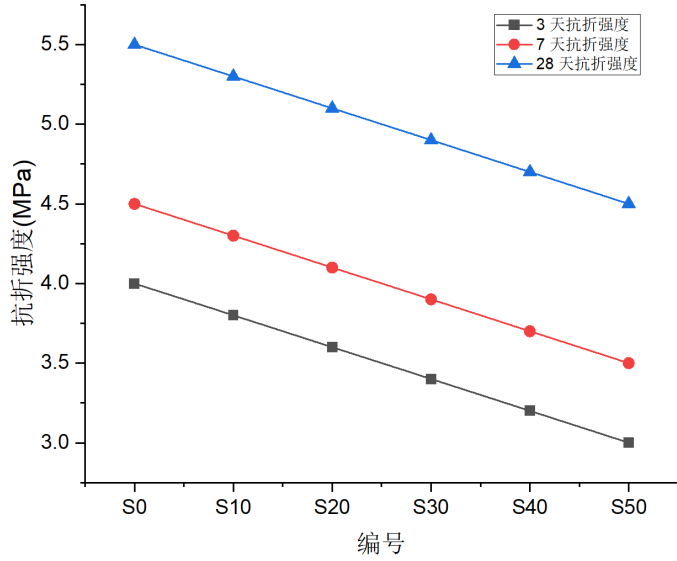


Figure 3. Flexural strength of cement-based materials with different blast furnace slag content at different ages
图 3. 不同高炉矿渣粉掺量水泥基材料在不同龄期的抗折强度

从图 3 中可以看出,所有编号的水泥基材料抗折强度都随龄期增长而增加。这符合水泥基材料的水化硬化规律,随着时间推移,水泥与高炉矿渣粉不断发生水化反应,生成更多水化产物,这些产物填充孔隙、增强颗粒间的粘结力,从而提升抗折强度。例如 S0 组,3 天抗折强度为 4.0 MPa,7 天增长到 4.5 MPa,28 天达到 5.5 MPa,增长趋势明显。

随着高炉矿渣粉掺量增加,各龄期的抗折强度均逐渐降低。以 28 天抗折强度为例,S0 组(未掺矿渣粉)为 5.5 MPa,S10 组(掺量 10%)降至 5.3 MPa,S50 组(掺量 50%)时仅为 4.5 MPa。这是因为高炉矿渣粉活性低于水泥,在早期水化进程中,其参与反应的程度较低,生成的水化产物数量较少,对强度的贡献有限;同时,过多的高炉矿渣粉稀释了水泥的有效成分,影响了水泥浆体的结构形成和强度发展。

早期(3 天和 7 天)抗折强度的降低幅度相对较大,而后期(28 天)降低幅度相对较小。在 3 天抗折强度数据中,S0 组到 S10 组强度降低了 0.2 MPa,S0 组到 S50 组降低了 1.0 MPa;在 28 天抗折强度数据中,S0 组到 S10 组强度降低了 0.2 MPa,S0 组到 S50 组降低了 1.0 MPa,但从强度的绝对值变化来看,早期强度变化的相对比例更大。这表明高炉矿渣粉对水泥基材料早期抗折强度的影响更为显著,而随着龄期延长,虽然强度仍受掺量影响有所降低,但降低趋势逐渐平缓,说明后期高炉矿渣粉的水化反应对强度有一定的弥补作用,使强度变化趋于稳定。

3.3. 耐久性结果分析

3.3.1. 抗渗性

不同高炉矿渣粉掺量水泥基材料的抗渗性测试结果如图 4 所示。

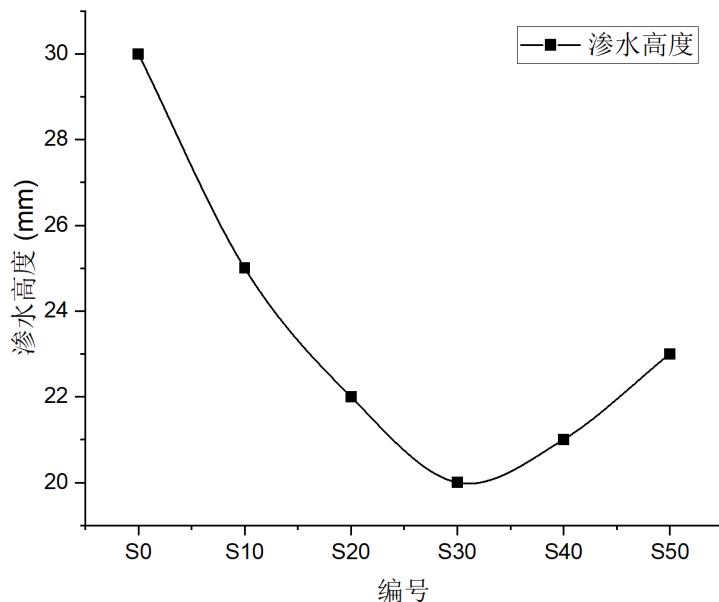


Figure 4. Impermeability of cement-based materials with different content of blast furnace slag powder
图 4. 不同高炉矿渣粉掺量水泥基材料的抗渗性

从图 4 数据可以看出,掺入高炉矿渣粉后,水泥基材料的渗水高度明显降低,抗渗性能得到显著提高。在掺量为 30%时,渗水高度最低,为 20 mm。这是因为高炉矿渣粉的二次水化反应消耗了水泥水化产生的氢氧化钙,生成了更多的凝胶状物质,如 C-S-H 凝胶,填充了水泥石中的孔隙,细化了孔径,使结构更加致密,从而有效阻止了水分的渗透。

3.3.2. 抗冻性

不同高炉矿渣粉掺量水泥基材料的抗冻性测试结果如表 3 所示。

Table 3. Freezing resistance of cement-based materials with different blast-furnace slag content
表 3. 不同高炉矿渣粉掺量水泥基材料的抗冻性

混合料类型	S0	S10	S20	S30	S40	S50
冻融循环次数	200	220	240	260	250	230
动弹性模量下降至初始值 60%时的质量损失(%)	4.0	3.5	3.0	2.5	2.8	3.2

从数据整体变化趋势来看，随着高炉矿渣粉掺量的增加，水泥基材料的冻融循环次数呈现先上升后下降的趋势。在掺量从 0 (S0 组)增加到 30% (S30 组)的过程中，冻融循环次数逐渐增多，表明抗冻性不断增强；而当掺量超过 30%后，冻融循环次数开始减少，抗冻性有所下降。质量损失方面，整体上随着高炉矿渣粉掺量的增加，质量损失呈现先降低后升高的趋势，这与冻融循环次数的变化趋势相对应，进一步说明适量掺加高炉矿渣粉可以有效改善水泥基材料的抗冻性能。

S30 组表现出最佳的抗冻性能，其冻融循环次数达到 260 次，动弹性模量下降至初始值 60%时的质量损失仅为 2.5%。这是因为适量的高炉矿渣粉(30%掺量)在水泥基材料中发挥了良好的微集料填充效应和火山灰反应。微集料填充效应使得水泥石内部的孔隙结构更加致密，减少了大孔数量，降低了水分在孔隙中的结冰膨胀压力；火山灰反应消耗了水泥水化产生的氢氧化钙，生成更多的凝胶状物质，进一步增强了水泥石的结构稳定性，从而显著提高了材料的抗冻性能。

质量损失是衡量水泥基材料抗冻性的重要指标之一。S0 组(未掺高炉矿渣粉)的质量损失为 4.0%，随着高炉矿渣粉掺量的增加，S10~S30 组的质量损失逐渐降低，这表明高炉矿渣粉的掺入在一定程度上改善了材料的内部结构，使其在冻融循环过程中更能抵抗破坏。然而，S40 和 S50 组的质量损失又有所回升，说明过高的高炉矿渣粉掺量可能会破坏水泥基材料的内部结构平衡，导致在冻融循环中更容易受到损伤，进而增加质量损失。

4. 结语

(1) 高炉矿渣粉的掺入对水泥基材料的工作性能有显著影响。适量掺加高炉矿渣粉(30%左右)可有效提高水泥基材料的坍落度和扩展度，改善其流动性，但掺量过高会导致流动性下降。

(2) 在力学性能方面，随着高炉矿渣粉掺量的增加，水泥基材料的早期抗压强度和抗折强度逐渐降低，但后期强度增长明显。在一定掺量范围内(50%以下)，28 天抗压强度仍能满足一定的工程要求。

(3) 高炉矿渣粉的掺入能显著提升水泥基材料的耐久性。无论是抗渗性还是抗冻性，都随着矿渣粉掺量的增加而得到改善，在 30%掺量时效果最为显著。

(4) 综合考虑工作性能、力学性能和耐久性，高炉矿渣粉在水泥基材料中的适宜掺量为 30%左右。在实际工程应用中，可根据具体的工程要求和环境条件，合理调整高炉矿渣粉的掺量，以实现水泥基材料性能的优化和资源的有效利用。

参考文献

[1] 贺晋瑜, 何捷, 王郁涛, 范永斌, 石红卫, 蔡博峰, 严刚. 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 347-355.

[2] 朱书涵, 陆一磊, 王松伟, 刘弯弯, 汤克勤, 李楠. 2020-2050 年我国水泥行业二氧化碳排放特征及减排潜力研究[J]. 环境科学学报, 2024, 44(2): 453-463.

-
- [3] 朱淑瑛, 刘惠, 董金池, 蔡博峰, 何捷, 杨璐, 夏楚瑜, 汤铃. 中国水泥行业二氧化碳减排技术及成本研究[J]. 环境工程, 2021, 39(10): 15-22.
 - [4] 贾小盼, 马瑞彦, 杜慧慧, 栗莎. 硫铝酸盐水泥熟料与磨细高炉矿渣粉复掺改性脱硫建筑石膏性能研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(2): 96-99.
 - [5] 王昆. 聚羧酸减水剂对水泥-高炉矿渣-粉煤灰三元体系性能影响研究[J]. 福建建材, 2024(3): 6-10.
 - [6] 马保亮, 王天明, 贺松定, 段赢. 高炉矿渣粉在水泥混凝土中的应用技术研究[J]. 交通世界, 2019(16): 166-167, 173.
 - [7] 曹钊, 曹永丹, 李现龙, 张金山, 周珊. 高炉矿渣-粉煤灰-脱硫石膏-水泥制备硅酸钙板的协同水化机理[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(1): 298-302.
 - [8] 郑旭, 刘晨, 颜碧兰, 王昕, 魏丽颖. 对比水泥对粒化高炉矿渣粉性能检测结果的影响研究[J]. 水泥技术, 2017(6): 30-39.
 - [9] 李岚丰, 王美丽, 程阳, 张维华. 对比水泥对粒化高炉矿渣粉活性指数影响的研究[J]. 四川水泥, 2016(12): 3.
 - [10] 冯云. 浅谈粒化高炉矿渣粉在水泥生产中的应用[J]. 新世纪水泥导报, 2015, 21(2): 20-24, 7.
 - [11] 孙宝云. 高炉矿渣粉在水泥和混凝土中的应用[J]. 新型建筑材料, 2004, 31(9): 56-57.
 - [12] 覃金英, 杨茂鑫, 邓玉莲. 利用粒化高炉矿渣粉生产 P.O52.5 水泥的研究与试生产[J]. 企业科技与发展(下半月), 2014(9): 15-16.
 - [13] 朱长胜. 浅析掺高炉矿渣粉的水泥稳定碎石基层材料的实际应用[J]. 农家科技(下旬刊), 2014(6): 152.