

淮 阴 工 学 院

毕业设计说明书（论文）

作 者： 刘文新 学 号： 111909130132

学 院： 交通工程学院

专 业： 道路桥梁与渡河工程

题 目： 碳化与硫酸盐侵蚀交替作用下

双掺钢渣水泥基材料的设计

指导者： 刘芳 讲师（博士）

评阅者： 钟勇强 副教授

2023 年 5 月

毕业设计说明书（论文）中文摘要

我国每年都会产生大量废弃钢渣，大量废弃钢渣的堆积不仅需要大量的资金处理，而且造成的环境污染违背当今的绿色发展理念。针对如何处理钢渣使得钢渣变废为宝的问题，本文设计了五个配比并进行了抗压试验、质量损失率试验与碳化深度试验，并得出以下结论：

- 1.掺入钢渣配比的试件抗压强度在硫酸盐侵蚀环境和碳化环境下上升和下降的速率普遍都要比不掺钢渣配比的快。
- 2.掺入钢渣的试件在受到硫酸盐侵蚀时，其质量变化量比原始试件更大。
- 3.随着掺入钢渣取代水泥掺量变多，碳化深度会增大，材料的抗碳化能力会减弱。
- 4.碳化与硫酸盐侵蚀交替作用下的试件要比单个环境下的破坏更严重，双掺钢渣水泥基材料的强度受到的影响与二者各自的影响效应不是简单叠加的关系。

关键词 硫酸盐侵蚀，碳化，力学性能，劣化性能，劣化机理

毕业设计说明书（论文）外文摘要

Title Design of Double Mixed Steel Slag Cement Based Materials under
the Alternating Action of Carbonization and Sulfate Erosion

Abstract

China produces a large amount of waste steel slag every year. The accumulation of a large amount of waste steel slag not only requires a large amount of funds for treatment, but also causes environmental pollution that goes against today's green development concept. In response to the issue of how to treat steel slag and turn it into treasure, this article designed five ratios and conducted compressive tests, mass loss rate tests, and carbonization depth tests. The following conclusions were drawn:

- 1.The compressive strength of specimens mixed with steel slag ratio generally increases and decreases faster than those without steel slag ratio in sulfate erosion and carbonization environments.
2. When the specimen mixed with steel slag is subjected to sulfate attack, its mass change is greater than the original specimen.
3. As more steel slag is added to replace cement, the carbonization depth will increase and the material's carbonization resistance will weaken.
4. The specimens subjected to the alternating action of carbonization and sulfate erosion are more severely damaged than those in a single environment. The strength of cementitious materials with double addition of steel slag is not simply influenced by the respective effects of the two.

Keywords Sulfate erosion, carbonization, mechanical properties, degradation performance, degradation mechanism

目录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 研究内容	3
1.4 技术路线	3
2 原材料	5
2.1 水泥	5
2.2 钢渣砂	7
2.3 钢渣粉	8
2.4 细骨料	9
2.5 粉煤灰	9
2.6 减水剂	10
2.7 水	10
2.8 试件准备	10
2.9 水泥基材料配合比设计	12
3 力学性能分析	14
3.1 28d 和 60d 的抗压强度	14
3.2 硫酸盐侵蚀下的抗压强度	16
3.3 碳化下的抗压强度	18
3.4 碳化和硫酸盐交替侵蚀下的抗压强度	19
3.5 本章小结	21
4 劣化性能分析	22
4.1 硫酸盐侵蚀作用下的质量损失率	22
4.2 碳化作用下的碳化深度	23
4.3 本章小结	25
5 劣化机理分析	25
5.1 硫酸盐侵蚀下的劣化机理分析	25
5.2 碳化作用下的劣化机理分析	26
5.3 本章小结	26

总结.....	27
致谢.....	28
参考文献.....	29

1 绪论

1.1 引言

水泥制品在使用过程中受到化学侵蚀及自然因素的影响，会导致其强度下降、力学性能减弱，进而对经济造成巨大损失。改进制品材料并采取有效的预防与维护措施，有助于减少这些损失。在面临大规模损毁或人员伤亡时，通常会造成极大的经济损失，除了直接的经济影响外，还会影响到个人财产和生命安全。

水泥砂浆长时间使用后，受外界环境影响，内部发生化学变化，进而导致其强度下降、开裂、结构破坏等，这就是化学侵蚀现象。常见的化学侵蚀方式包括硫酸盐侵蚀和水泥基碳化等。研究硫酸盐侵蚀和碳化环境对水泥基材料力学性能的影响非常重要，因为这对材料的性能有着重大的影响。可以采取有效措施有效地增强水泥基材料的耐久性，以确保其能够持久地使用。通过研究，可以更精确地了解硫酸盐侵蚀和碳化环境对水泥基材料力学性能的影响，从而为相关工程设计提供参考。

我国产生大量钢铁废渣，这是一种常见的固体废弃物。如果不及时处理，这些废渣不仅会占用大量土地资源，还会对环境造成污染。虽然环境污染问题是普遍存在的，但并非每一个问题都可以通过简单的经济手段来解决，必须依据科学发展观来科学处理环境和经济发展之间的关系。达成人类与自然和谐发展、可持续发展的目标，需要采取措施保护环境、节约资源并促进经济与环境的协调发展。

1.2 国内外研究现状

当前，国内外对于单因素对水泥基材料强度特性的研究已经相对全面，但对多因素共同作用下的水泥基材料强度特性研究还不够深入，特别是针对碳化和硫酸盐侵蚀相互作用下的影响还有较少的研究。本文研究了碳化和硫酸盐侵蚀相互作用对水泥基材料强度特性的影响，并对单一因素和多因素作用下水泥基材料性能的变化规律进行了比较分析。

1.2.1 国内研究现状

我国在钢渣废料的利用方面与发达工业国家相比仍有较大的差距。尽管大量的钢渣废料堆积引起了环境污染和资源浪费，但我国在建筑材料领域内对钢渣的应用研究已经

有很多年历史。特别是在将钢渣用作水泥砂浆掺合料的方面，已经深入广泛地研究，并取得了相关成果，理论体系也相对完善^[1]。中国建筑材料研究院在 20 世纪 70 年代初期进行了钢渣作为水泥基材料掺合料的试验研究和理论研究，取得的科研成果相当可观，对于钢渣作为水泥基材料的掺合料进行了详尽的试验和理论研究。

在年代初，中国的冶金建筑研究总院开始研究将钢渣粉作为水泥基材料的掺合料应用。然而，钢渣粉的使用量应该很小，不能超过 20%^[2]。确保机械强度和体积稳定性性能符合要求。

国内近年来针对钢渣掺合料的应用研究重点关注掺量、细度等因素对强度、耐久性能的影响规律，以及钢渣粉活性激发技术等方面。特别是在水泥基材料中，对钢渣粉的作用规律进行了深入探究。李永鑫在研究钢渣掺合料在水泥基材料中的作用规律方面已经有了一定的成就，他的研究系统较为完善，深入探究了此类材料的性质和应用价值，在添加钢渣粉时，掺量若低于 20%，将会提高砂浆的抗氯离子渗透能力，这是他所指出的^[3]。他还发现，添加钢渣粉后，砂浆的干燥收缩得到有效地减少，同时还能够提高水泥基材料的抗冻性能。

有许多专家学者曾对硫酸盐侵蚀和碳化对水泥基材料力学性能的影响进行了研究，其中董必钦等人研究了硫酸盐对水泥基材料所造成的损害，并进行了有效的分析，获得了一些规律性的结论。乔宏霞等人 and Hadjasodok 等人的研究表明，当双掺钢渣用于水泥基材料时，在硫酸盐腐蚀之后，抗压强度和抗折强度与普通水泥基材料相比变化不大。王怿涵等人的试验研究发现，当硫酸盐干湿循环次数增多时，水泥砂浆的抗压强度会呈现出下降的趋势^[4]。但在经过 15 次硫酸盐干湿循环后，水泥砂浆的质量开始显著增长，并且之后的循环中，水泥砂浆的质量基本保持不变^[5]。赵庆新、巴明芳、赵铁军等人进行研究，在二氧化碳环境下研究了水泥基材料损伤后的情况。研究表明，经过碳化后的水泥基材料的峰值应变基本不变，但峰值应力有所上升^[6]。另外，水泥基材料等级越高，峰值应力上升幅度也越大。赵冰华和他的团队进行试验后发现，使用碳化工艺能够提高材料的抗压强度，但是会降低抗弯强度以及抗渗能力。张金喜等人进行了研究，探究了水泥基材料在各种劣化过程中的力学性能变化。他们发现，在水泥基材料碳化之后，其抗压强度有明显提升，并且在短时间内遭受硫酸盐干湿循环的影响不大，对材料的力学性能几乎没有影响。由此推断，碳化处理后的水泥基材料可以显著提高其耐压强度^[7]。

1.2.2 国外研究现状

发达的工业国家已经建立了完善的钢渣综合利用工业体系，并采用高效的技术手段使钢渣综合利用效率相对较高。由于其迅速发展、高度重视环保问题并且早期开始研究循环技术等原因，导致这一优势得以产生。2003 年的数据表明，废渣排放量的 69% 被用于土木工程，例如路基工程 and 水泥砂浆集料。相反，日本和德国等国家的钢渣综合利用率已经基本达到 100%^[8]。2010 年的日本环境公报显示，有 64% 的钢渣废弃物被用作土木建筑工程材料。

针对工业发达国家，目前对于钢渣替代水泥基材料骨料的研究较为广泛且理论比较成熟，但是在掺合料方面仍处于试验探索阶段，相关资料比较缺乏。为此，美国成立了 SCA 组织，专门致力于解决钢渣掺合料的应用问题，并将其提上了正式的议程。钢渣骨料在路基材料中的应用比例较高，并且目前尚需进一步深入研究其在民用和工业建筑结构中的应用。

总的来说，国外的研究重点主要在于钢渣骨料的利用，而我国则对钢渣掺合料的应用研究比较成熟全面。不过，目前很少有报道关于钢渣同时作为双替代碎石骨料和掺合料，以及作为钢渣粗骨料和掺合料的研究。本篇论文对钢渣的特性和其在水泥砂浆中的应用做了详细探讨，并指出现有研究的不足和未来的研究方向。

1.3 研究内容

对不同掺配比例的双掺钢渣水泥基材料进行力学性能试验，包括抗压强度，分析强度的演变规律及其与掺配比例之间的相关性。探究提升力学性能、最大综合利用钢渣的掺配比例。分析碳化与硫酸盐侵蚀交替作用下双掺钢渣水泥基材料质量损失率随各影响因素的变化规律。对各试验环境下双掺钢渣水泥基材料进行碳化深度的测定，分析不同试验环境下碳化深度的变化规律。结合 XRD 微观测试技术综合分析碳化与硫酸盐侵蚀分别作用下双掺钢渣水泥基材料不同深度的侵蚀产物，探索碳化与硫酸盐侵蚀作用下双掺钢渣水泥基材料的劣化机理。

1.4 技术路线

本文的技术路线见图 1-1。

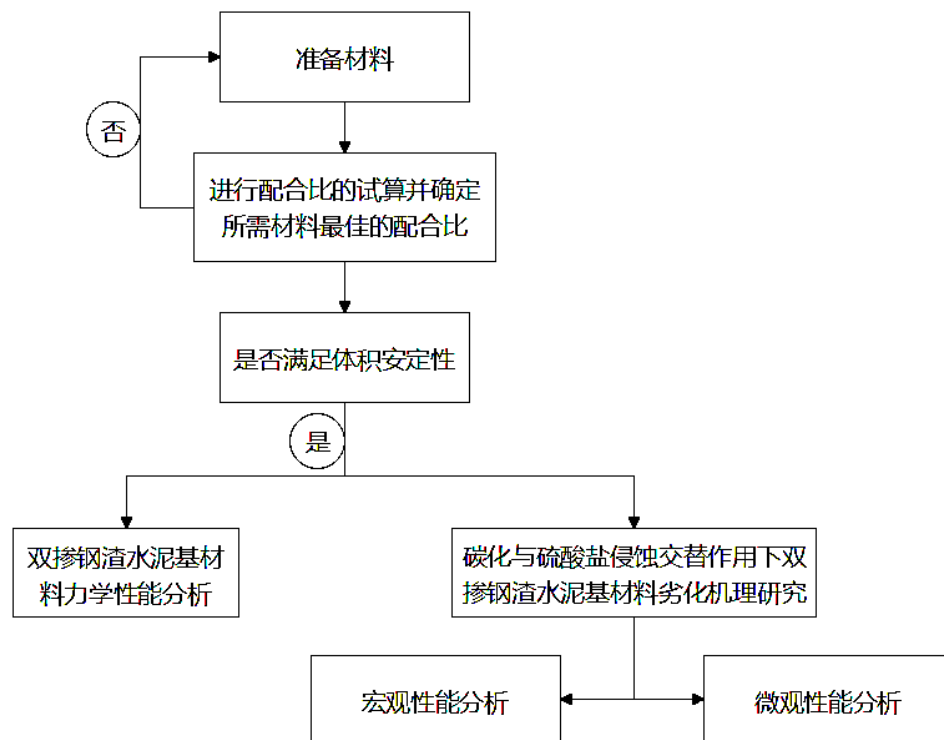


图 1-1 技术路线

2 原材料

2.1 水泥

水泥是一种可在水中硬化的胶凝材料，它由硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙等成分组成，该材料能够显著提高其强度，并广泛应用于各种工程建设中，因此被认为是一种必不可少的胶结材料^[9]。本次实验使用的水泥来自淮安海螺厂，按照《公路工程水泥水泥砂浆试验规程》（JTGE51-2002）中水泥技术性质的试验规定，需要对水泥的细度、凝结时间、稳定性和砂浆强度等指标进行以下试验：

1) 表观密度

将准备好的水泥样品放入李氏瓶中，等待一定时间后测量其外观密度，并通过运算求出其值。试验后，水泥的表观密度为 3.16g/cm^3 。

2) 细度

细度是指水泥颗粒的厚度和细度。水泥颗粒愈小，能与水充分反应的表面积愈大，且单位体积内的水分更充足，水化反应速度亦更迅速。

我国的《水泥砂浆外加剂》标准（GB8076-2008）对于硅酸盐水泥、普通水泥、矿渣水泥和火山灰水泥等具有不低于 $300\text{m}^2/\text{g}$ 的细度比表面的水泥，提出了较为严格的要求。我国规定，水泥必须具有不低于 $300\text{m}^2/\text{g}$ 的细度比表面才能被使用，这适用于硅酸盐水泥、普通水泥、矿渣水泥和火山灰水泥^[10]。这一要求被明确提出在《水泥砂浆外加剂》（GB8076-2008）标准中。水泥的另一种类型，其标准筛网筛分后不能剩余超过 10% 的物料。水泥的不同种类在通过标准筛网筛分后，剩余物料的量不得超过 10%^[11]。

筛析法又称负压筛法和水筛法，它是在负压条件下，将一定规格的水泥样品在规定的距离内逐粒投入水筛中，通过筛后的细度称为筛余量。本试验采用负压筛法。通过试验，筛余 2.21%。

3) 水泥净浆标准稠度

在进行测试时，应使用标准密度的净浆胶泥，以保证其凝固时间与安定性的测试结果能相互比较。中国国家标准中，用稠度仪测量水泥净浆液的粘稠度，取试钻下沉深度 28 ± 2 毫米时的净浆液作为“标准稠度”，而这个时候所用的水就是标准水。经实验，该产品的标准耗水量可达 23.97%。

4) 凝结时间

水泥成熟期是影响水泥砼施工质量的关键因素。初凝时间过短，会对拌和物的输送及浇筑造成不利影响；如果终凝时间太长，会对整个项目的建设造成很大的影响。

目前的规范（JTJ053-94）要求一般硅酸盐水泥的初凝固时间不能少于 45 分钟，终凝固时间不能少于 600 分钟。中国《标准》规定，采用用标准密度水配成的水泥浆，将其放在试样中，用标准针头对其进行量测。测试结果：初始固化时间为 196 分钟，最终固化时间为 480 分钟。

5) 安定性

水泥体安定性是一种物理性质的指标，它反映了水泥体在硬化过程中的体积变化均匀程度。

根据目前的规范（JTJ 053—94），水泥的安定性有雷氏比色法和纸板比色法。雷氏法是用来测量经雷氏钳煮沸的水泥净浆液的膨胀系数；用烧饼试验方法，通过对烧饼样品进行烧饼试验，观察烧饼外观的变化，从而判断烧饼对水泥的体积稳定性。本试验采用雷氏法，其膨胀值为 2.33（<5.0mm），认定该水泥安定性合格^[12]。

6) 强度

水泥的强度是水泥技术要求中最基本的指标，它直接反映了水泥的质量水平和使用价值。水泥的强度除了与水泥本身的性质（如熟料的矿物组成、细度等）有关外，并与水灰比、试件制作方法、养护条件和时间等有关。

按照国家标准，水泥和标准砂的质量比为 1:3，按照规定的水灰比 1:2，以标准成型方法制成 4cm×4cm×16cm 棱柱体，并在标准养护条件下，养护至规定龄期的试块，测定其抗折和抗压强度值（见表 2-1）。

表 2-1 水泥胶砂强度检测结果

抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
3d	28d	3d	28d
21.8	50.0	4.5	7.8

根据上述所有试验的结果可知本试验用的水泥主要质量指标均满足国标要求。

2.2 钢渣砂

废钢，俗称污泥，转化为炼钢过程的副产品。这是指在钢铁冶炼过程中，由于原材料中的铁水、废钢等经历了各种化学、物理作用，而得到的一种复合固溶体。在冶炼钢水时，铁水、废钢等原材料经过各种化学反应和物理作用，形成一种复合固溶体，称为钢水的产物。本试验中使用的废钢是炼钢后的废钢。一块大型的钢渣是在冶炼后形成的，经过板车运输到闷渣厂进行处理。在那里，通过热闷方法将这块大型钢渣分解，随后使用弱磁铁和强磁铁从渣子中提取出全部的铁，并最终制成不含铁的钢渣。热渍是钢渣处理的重要工艺之一，其过程是先将熔融状态下的钢渣倒入渣盘中，再用车辆运到渣跨，将其冷却至 300~400℃，待钢渣基本固化后，利用起重机将其翻出并送入闷渣池或闷渣罐中。当闷渣池装满时，关闭其盖子进行水封，以实现匀热处理。需要通过间歇性的喷水热闷处理来达到较好的钢渣处理效果，同时需要不断进行水渣比、喷水强度、排水量和排气量的调整，以维持闷渣池充足的饱和蒸汽和高温水浸条件。最后完成热闷处理后，再将钢渣铲出进行深加工处理^[13]。

钢渣在进行浸水膨胀性实验时会因其中含有游离 CaO，与水反应而体积微膨胀，如果将膨胀率过大的钢渣掺入水泥稳定碎石中，基层会产生过多开裂，降低基层的耐久性。因此在处理完成后进行处理。在用钢渣掺入水泥稳定碎石之前，必须检测钢渣的膨胀性，以分析膨胀率是否符合规范要求。

文章使用浸水膨胀率试验来测试钢渣的体积稳定性，试验的原理是钢渣在遇水或水蒸气时会发生膨胀。通过在 90℃的水浴中进行一定时间的处理，钢渣中的游离氧化钙和游离氧化镁等物质将生成新的物质来填充内部孔隙，导致体积膨胀。随着水浴的时间增加，生成的新物质将逐渐填满内部空隙并增加钢渣的体积稳定性，在 10 天内进行的水浸实验中可以通过浸水膨胀率来评估钢渣的性能。

根据相关规定，进行钢渣膨胀率试验的钢渣颗粒大小应符合表 2-2 中规定的要求。

表 2-2 钢渣粒度分布

筛孔尺寸（mm）	31.5	26.5	13.2	4.75	2.36	0.3	0.075
累计筛余（%）	0	2.5	30	52.7	65	80	94

按照颗粒大小分类将钢渣分成五个等级，随后依照表 2-2 中的比例精心拼配，制造

出纯净的钢渣料。对含有纯钢渣的物料进行重型压实实验，旨在测定其最佳含水量和最大干密度。纯钢渣最适宜的含水量是 3.3%，其最大干密度为 2.971g/cm^3 。将钢渣料与最佳含水量和最大干密度相混合，使用重型击实仪成型试件，并与试模一同放入恒温水浴箱中，在试件上方放置半圆形荷载板和百分表进行测试。

钢渣浸水膨胀率的试验制备需要两个试样用于测量钢渣在水中的膨胀率，将这两个试样同时浸泡在温度恒定的水浴中，确保试样完全被水淹没。每天都需要对水浴箱进行加热，并在加热前记录百分表的读数。加热至 90°C 后，要保持水浴箱水温在 $90\pm 3^\circ\text{C}$ 恒温 6 个小时，并进行控温。之后停止加热，等待水温自然冷却。接下来的每天都按照这个步骤进行，并在升温前读取百分表的读数。需要连续进行 10 天的测定，10 天后才可以读取百分表的最终读数^[14]。

钢渣的浸水膨胀率按式（2-1）计算：

$$\gamma = \frac{d_{10}-d_0}{120} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中： γ —浸水膨胀率，%；

d_{10} —百分表终读数，mm；

d_0 —百分表初读数，mm。

根据规范要求，钢渣的浸水膨胀率不得大于 2%。本试验膨胀值分别为 0.77mm 和 0.80mm，都小于 1mm。因此可以得出结论，该钢渣的膨胀性很小，可以直接进行利用。

2.3 钢渣粉

我们对之前介绍的钢渣砂通过研磨机进行研磨，筛选出钢渣粉，并按照规程进行活性指数、流动度比和安定性的测定，结果如下：

1) 活性指数

按照 3:7 的质量比将钢渣粉和基准水泥混合均匀以制备胶砂，遵循 GB/T17671-1999 规定中有关水泥胶砂强度试验的相关规定。经过与基准样品的对比，得出本实验使用的 28 天的钢渣粉的活性指数为 65%，符合国家的二级钢渣粉标准。

2) 流动度比

按照 3:7 的质量比将钢渣粉和基准水泥混合后，按照 GB/T 2419-2005《水泥胶砂流动度》的相关规定分别测试基准样和受检样的胶砂流动度，并经过比较后发现，本实验

中使用钢渣粉的流动度比为 97%，符合国家标准中液流量度大于 90%的规定。

3) 安定性

钢渣的安定性是钢渣最关键的性能之一，它直接影响着工程的安全可靠性和使用寿命。因此，保障钢渣的安定性是非常必要的。在本文中，使用沸煮法来检测钢渣粉的稳定性，采用雷氏夹法膨胀值为 1.75mm，在标准规定不大于 5mm 的范围内。

根据上述所有试验的结果可知本试验用的钢渣粉主要质量指标均满足国标要求。

2.4 细骨料

自然条件下（以岩石风化为主）形成的粒径小于 5 毫米的岩石颗粒被称为天然砂，包括天然海沙、湖沙、河沙或碎石砂（即矿物自然分解成细小的砂粒）。

试验中用的小粒石料是自然沙子，其主要构成成分是石粒，其中二氧化硅含量超过 65%。由于沙子的颗粒均匀，质地细密且结构松散，因此其吸水性很强，而且还具有隔音、防潮、抗破坏、抗风化、防褪色等特点，并且不溶于水，不含辐射^[13]。

表 2-3 展示了天然河砂的基本物理指标，它的细度模数为 2.95，粒径分布较为优良。

表 2-3 天然河沙物理指标

指标	实测值	指标	实测值
表观密度（kg/m3）	2680	泥块含量（%）	0.13
堆积密度（kg/m3）	1396	含沙量（%）	1.06

上述指标结果满足国标要求，可以用于本次试验。

2.5 粉煤灰

粉煤灰是一种由燃煤电厂产生的副产品，其粒度细于水泥，具有良好的活性，经常用作砂浆掺合料。主要成分是 CaO 和 Al₂O₃，也含有少量的 SiO₂ 和 Fe₂O₃。一种低碱性的矿物可以与水泥产生反应，形成水化铝酸钙，这种水化铝酸钙会在水泥水化的过程中生成大量的水化硅酸钙。粉煤灰中的多种矿物质以氧化硅、氧化铝和氧化铁的化学形式存在，对水泥的凝固时间、强度和体积稳定性都有不可忽视的影响。

添加粉煤灰对水泥砂浆的性能有重要影响。掺入粉煤灰后，可以提升砂浆的流动性能，改进工作性能，减少收缩及裂缝，另外提高其抗压能力和耐久性。虽然粉煤灰在早期可能会影响砂浆的强度，但后期的强度影响不太显著^[14]。这次试验所使用的粉煤灰，

比表面积为 $450\text{m}^2/\text{kg}$ ，符合要求，可用于实验。

2.6 减水剂

通过向水泥砂浆中添加适量的减水剂，可以有效提升砂浆的流动性，避免砂浆流失过多水分，同时也能增强砂浆的保水能力，从而进一步提高砂浆的强度。水泥砂浆中的水泥颗粒存在着相互接触的情况，若无法充分接触，便会在水泥颗粒之间形成空隙，从而导致砂浆出现断裂现象。通过使用减水剂可以促使水泥颗粒充分接触并形成水膜，从而缩小砂浆中水泥颗粒间的空隙，达到减少用水量的效果^[15]。

在水泥砂浆中加入减水剂可以有效改善砂浆的流动性和可操作性。本次实验使用的减水剂是一种萘系制成的市售粉状减水剂，它的颜色为棕黄色，经过测定其减水率为 15%。

2.7 水

本次试验采用实验室的普通自来水。

2.8 试件准备

试验前进行稠度测试以验证原始配比的合理性，在测试时，使用了测定砂浆稠度的设备，除此之外还用到了钢制捣棒和秒表。首先需要擦干测量仪的表面，接着将砂浆混合料放入其中，使用捣棍从中心到边缘敲打 25 次，再敲打 5 到 6 次使砂浆表面平坦。然后将测量仪放到基座上，并调整测试锥体，直到测试锥体和砂浆表面相接触。接下来，拧紧刹车螺丝，使齿轮下端与砂浆上端相接触，指针指向零点。最后，松开刹车螺丝并使用秒表计时 10 秒后，再将螺钉固定，使齿轮下端和砂浆上端相接触，然后从表盘上读取沉降量，以确定砂浆的稠度大小^[16]。经测定，本试验中砂浆稠度平均值为 74mm，符合标准范围 70~90mm。因此，该砂浆的稠度值合格。

然后开始制备试件，模具采用了尺寸为 $70.7\text{mm}\times70.7\text{mm}\times70.7\text{mm}$ 的立方体铁模，成型后 24 小时，取出模具，放置于标准的保养箱中，在 $20\pm2^\circ\text{C}$ ，相对湿度 95% 的环境中保存 28d。具体实验准备工作如下：

1. 硫酸盐侵蚀试验

根据《标准》中的硫酸盐干湿法对试件进行了检测。将试件分别编号为 S0、S1、S2、S3，每个配比选取 6 个试件，一共有 18 个试件，所采用的侵蚀溶液都是质量分数

为 5% 的硫酸钠溶液。养护到 28 天龄期的前 2 天，将测试样品从标准养护箱中移出，并用清洁的手帕擦拭其表面，放置在秤上进行称重，然后将其放入硫酸盐干湿循环试验机（图 2-1）中进行试验，10 次循环为一个大循环，一次浸泡 1.5 天。



图 2-1 硫酸盐干湿循环试验机

2. 碳化试验

根据《标准》关于“碳化”的规定，对样品进行了测试。样品的编号为 C0、C1、C2、C3，每个配比选取 5 个试件，一共有 15 个试件。当由试件到达了龄期的前 2 天时，需将其从标准养护箱中取出，然后放入烘干箱中，在 60°C 下烘 48h，最后将试件放入 $(70\pm 5)\%$ 相对湿度和 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 温度的碳化试验箱（图 2-2）中进行测试，3 天为一个循环。



图 2-2 碳化试验箱

3. 碳化和硫酸盐交替侵蚀试验

这些样品被分别编号为 SC0、SC1、SC2、SC3，每个配比选取 6 个试件，一共有 18 个试件。在循环测试中，遵循之前的测试程序，先将试件进行硫酸盐侵蚀干湿循环 10 次，随后烘干 1 天，最后进行碳化 3 天，以此为一个循环。

2.9 水泥基材料配合比设计

本试验制备了五组配合比。（见表 2-4）

0 号配比为原始配比，采用水、水泥、天然砂、减水剂作为原材料；1、2 号配比在原始配比上分别用 20% 和 30% 的钢渣砂取代天然砂；根据大量文献显示钢渣粉最佳取代水泥用量为 30%，加入固定掺量的粉煤灰的目的是增加水泥活性；3、4 号配比在钢渣粉和粉煤灰固定取代 30% 水泥用量的基础上，分别用 20% 和 30% 的钢渣砂取代天然砂。

其中设计 0 号原始配比的目的是为了和后面的配比做对照；设计 1 号和 2 号配比的目的是为了探究在单掺钢渣的情况下钢渣砂取代量是 20% 较优还是 30% 较优；设计 3 号和 4 号配比的目的是为了探究在双掺钢渣的情况下钢渣砂取代量是 20% 较优还是 30% 较优，并且和 1 号和 2 号配比作对比。

表 2-4 各组试件配合比

试件编 号	水灰比	水泥 (kg/m ³)	水(kg/m ³)	天然砂 (kg/m ³)	钢渣砂 (kg/m ³)	钢渣粉 (kg/m ³)	粉煤灰 (kg/m ³)	减水 剂%
0	0.4	380	152	570	0	0	0	0.3
1	0.4	380	152	456	114	0	0	0.3
2	0.4	380	152	399	171	0	0	0.3
3	1.0	152	152	456	114	114	114	0.3
4	1.0	152	152	399	171	114	114	0.3

注：减水剂用量为胶凝材料总质量的百分比。

3 力学性能分析

3.1 28d 和 60d 的抗压强度

3.1.1 试验过程

首先将养生到 28d 和 60d 龄期的试件取出后及时进行试验，试验仪器为抗压强度试验仪（见图 3-1），测试前需要将试件上下表面多余水分擦除，将试件放到试验机的下压板上，试件的承压面与成型时的顶面垂直，试件中心与上下加压板对中，开动试验机后垂直加压^[18]。在加压过程中保持持续均匀加荷，平均位移速度控制在 0.01mm/s，砂浆试件破坏时记录立方体试件抗压强度。



图 3-1

3.1.2 试验数据

各号砂浆试件 28d 和 60d 抗压强度试验数值见表 3-1 和表 3-2，其中每组试件的数据取自多次试验的平均值，并已去除误差较大的数据。

表 3-1 试件 28d 抗压强度

试件编号	抗压强度/MPa
0	27.2
1	33.1
2	34.5
3	25.4
4	26.3

表 3-2 试件 60d 抗压强度

试件编号	抗压强度/MPa
0	35.9
1	44.8
2	46.2
3	44.6
4	45.4

根据上述数据制作 28d 和 60d 的抗压强度柱状图（图 3-2）。

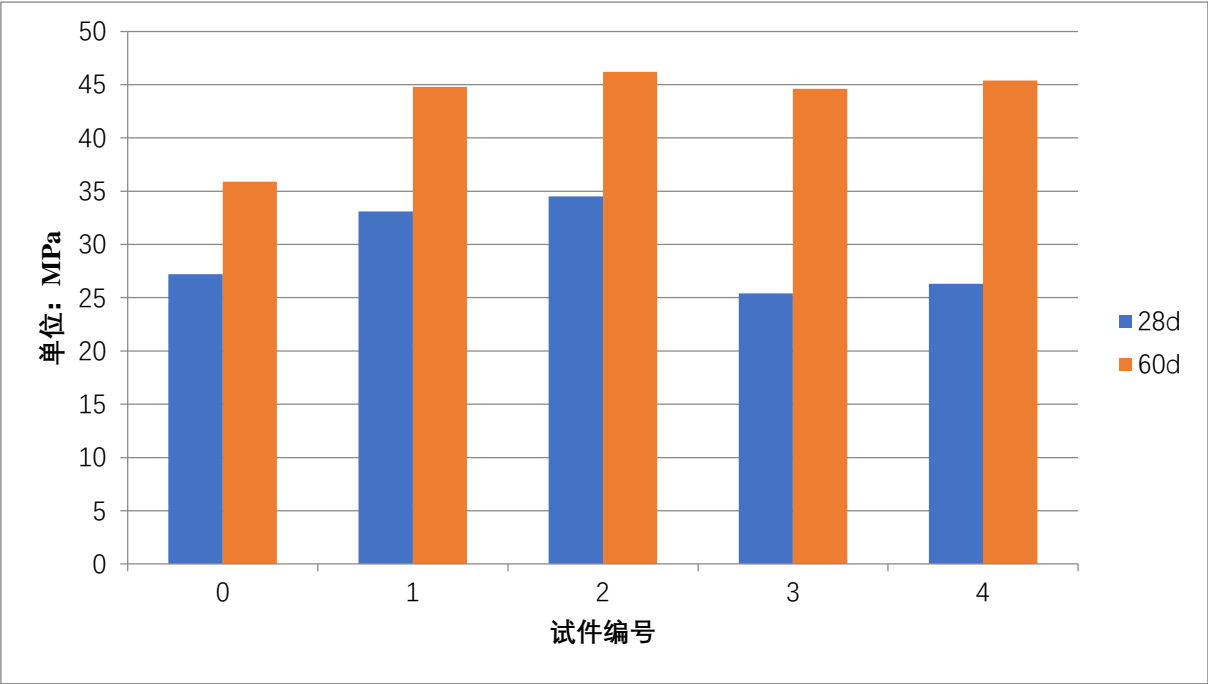


图 3-2 试件 28d 与 60d 抗压强度柱状图

通过上图数据可知：

- 1.各号试件 60d 的抗压强度都大于 28d 的抗压强度；
- 2.与原始配比相比较，1、2 号配比的抗压强度都大于原始配比，3、4 号配比的抗压强度则都要小于原始配比，且钢渣砂代替 30%天然砂的抗压强度要优于钢渣砂代替 20%天然砂的抗压强度。
- 3.与单掺钢渣砂的 1、2 号配比相比，双掺钢渣的 3、4 号配比后期抗压强度的增长速率明显大于单掺钢渣砂。

3.1.3 原因分析

水泥和水混合后会发生水化反应，其中的硅酸三钙在常温下会与空气中的水发生反应，生成硅酸钙和氢氧化钙，从而使得水泥的后期强度逐渐提高^[19]。

对比于天然砂骨料的平滑表面，钢渣骨料的表面具有更加粗糙和复杂的特征，这为水泥浆提供了优质的粘附层。钢渣孔隙多，使得拌和水和水泥浆体容易渗入到骨料中并凝结固化。钢渣具有微弱的水硬活性，因此在后期会发生一定程度的水化反应产生凝胶产物，这些内部因素可以改善砂浆试件的抗压强度^[20]。优化这些内部因素可以提高砂浆试件的抗压强度。30%钢渣骨料与砂浆骨料的混合级配比 20%的更优，能够更好地填充空隙，使拌合物的密度更大，提高试件的密实性，进而提高抗压强度。

虽然钢渣磨成粉末后能稍微提高其微弱的水化活性，但与水泥胶凝材料相比，仍然远远达不到同样的水硬活性。钢渣粉和粉煤灰的掺入会导致水泥用量减少，对早期强度有显著影响，但后期钢渣粉加速水化会对强度改善产生积极作用。在后期水化环境中，粉煤灰通过与水化产物反应，消耗钙元素加速钢渣粉的水化进程，有利于提高砂浆的抗压强度^[21]。

3.2 硫酸盐侵蚀下的抗压强度

3.2.1 试验过程

分别将在硫酸盐侵蚀循环 10 次、20 次、30 次后的试件取出，然后及时进行抗压试验，砂浆试件破坏时记录立方体试件抗压强度。

3.2.2 试验数据

各号砂浆试件在硫酸盐侵蚀下的抗压强度试验数值见表 3-3，其中每组试件的数据

取自多次试验的平均值，并已去除误差较大的数据。

表 3-3 试件在硫酸盐侵蚀下的抗压强度

次数	0	1	2	3	4
10 次	27.9	34.6	35.3	26.6	27.9
20 次	28.6	37.5	37.7	29.1	30.4
30 次	27.5	34.7	34.9	27.1	28.2

根据数据绘制柱状图（图 3-3）。

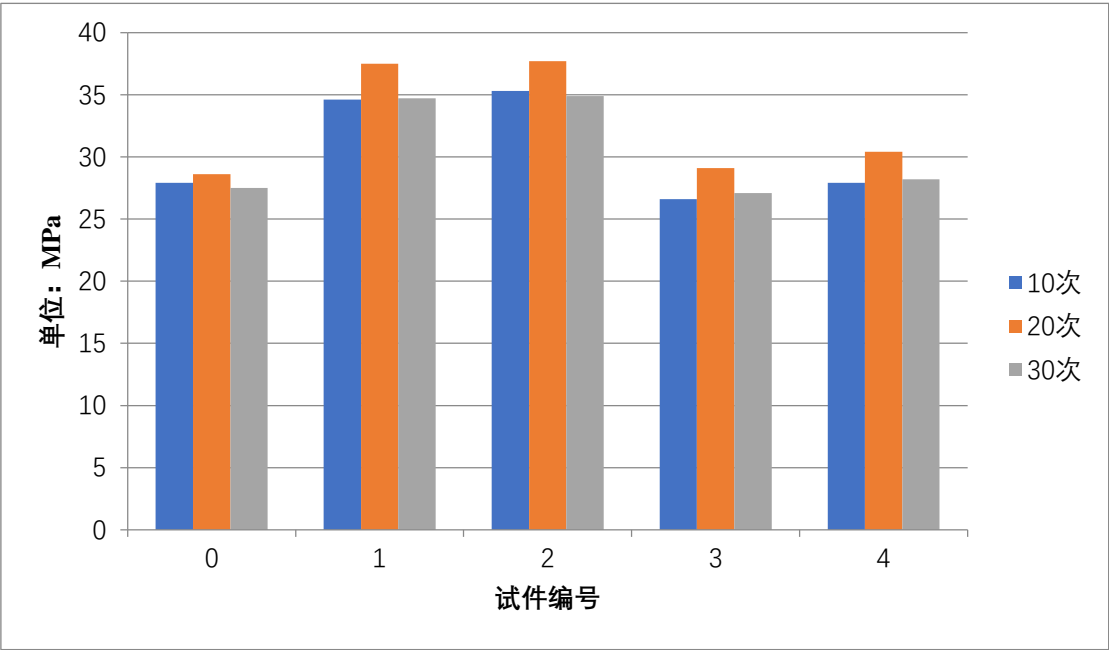


图 3-3 试件硫酸盐侵蚀下的抗压强度柱状图

通过上图数据可知：

- 1.各号试件的抗压强度都呈现先上升后下降，在循环 20 次时抗压强度达到最大，而后试件的抗压强度开始下降；
- 2.与原始配比相比较，其他试件配比的抗压强度上升速率和下降速率都要更快。

3.2.3 原因分析

试件经过 28 天养护后，其强度仍会继续上升。当干湿循环次数小于 20 次时，由于侵蚀对试件的影响较小，试件的强度增长总体上占主导地位，表现为增长。钢渣中的活性物质参与水化反应导致双掺比试件强度增长速率高于原始配比。

硫酸盐溶液在干湿循环过程中会在砂浆内部形成膨胀结晶体，从而导致破坏。水化

铝酸钙与硫酸盐溶液中的硫酸根离子反应会生成钙矾石，同时硫酸根离子与水泥水化产物反应会生成石膏，这两种反应产生的产物体积分别为原来的 2.5 倍和 1.2 倍。由于钢渣骨料本身空隙率比普通骨料大，盐结晶体可以填充部分空隙并增加膨胀力对砂浆的破坏^[22]。因此，掺钢渣的配比比原始配比的砂浆破坏更严重，而不同掺量的钢渣水泥基材料则没有明显的规律。

3.3 碳化下的抗压强度

3.3.1 试验过程

分别将碳化 3 天，6 天，9 天的试件取出，然后及时进行抗压试验，砂浆试件破坏时记录立方体试件抗压强度。

3.3.2 试验数据

各号砂浆试件在碳化作用下的抗压强度试验数值见表 3-4，其中每组试件的数据取自多次试验的平均值，并已去除误差较大的数据。

表 3-4 试件在碳化下的抗压强度

天数	0	1	2	3	4
3d	27.6	34.1	35.8	26.4	27.1
6d	28.3	36.3	38.3	29.1	28.8
9d	29.1	38.7	40.4	31.9	31.2

根据数据绘制柱状图（图 3-4）。

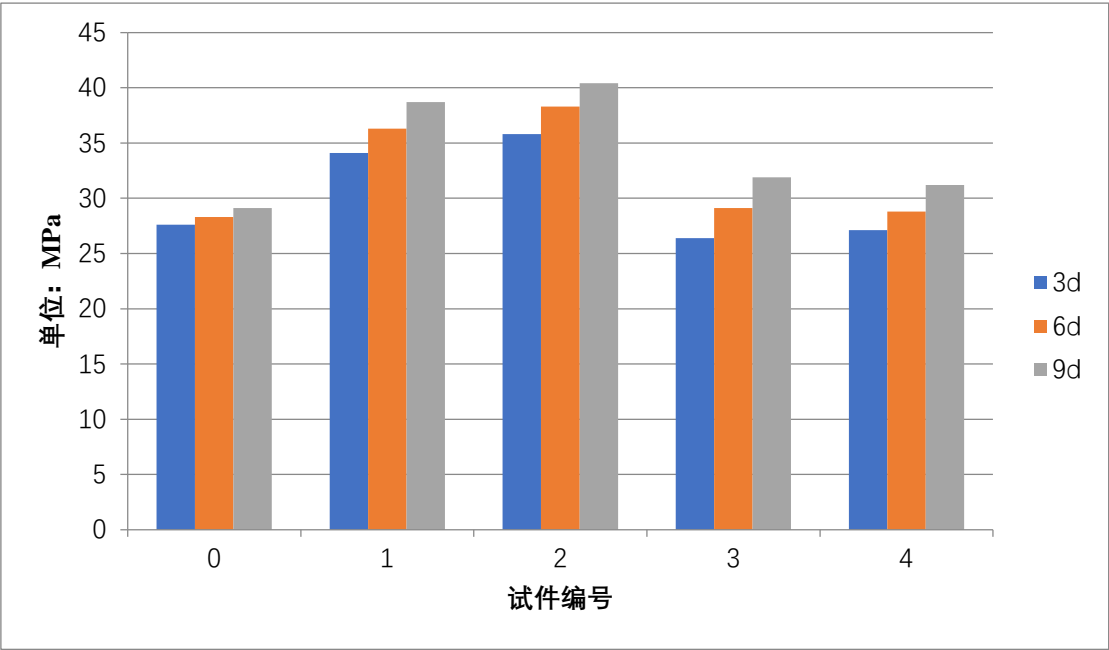


图 3-4 试件碳化下的抗压强度柱状图

通过上图数据可知：

- 1.各号试件的抗压强度都呈现了一定程度的上升；
- 2.与原始配比相比较，其他试件配比的抗压强度上升速率明显要更快一些。

3.3.3 原因分析

影响碳化反应的两个关键因素是环境中 CO_2 的扩散率以及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的浓度。试验开始时，试件内的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量充足，且其内部孔隙比较疏松。由于 CO_2 的扩散速度较快，反应迅速生成的 CaCO_3 填充了水泥砂浆的孔隙结构，提高了实体的密实度，从而增加了试件的抗压强度^[23]。

废钢中的 Ca_2SiO_4 和无 CaO 等都可以碳化并生成 CaCO_3 。碳酸钙能够参与水泥的水化反应，生成氢氧化铝钙碳酸盐水合物，从而能够有效地提高砂浆的抗压强度，使得在掺入钢渣的情况下，其强度提升的速度明显快于未掺入钢渣的情况^[24]。

3.4 碳化与硫酸盐交替侵蚀下的抗压强度

3.4.1 试验过程

分别将经历 1 次、2 次、3 次碳化和硫酸盐侵蚀大循环的试件取出，然后及时进行抗压试验，砂浆试件破坏时记录立方体试件抗压强度。

3.4.2 试验数据

各号砂浆试件在碳化和硫酸盐侵蚀作用下的抗压强度试验数值见表 3-5，其中每组试件的数据取自多次试验的平均值，并已去除误差较大的数据。

表 3-5 试件在碳化和硫酸盐交替侵蚀下的抗压强度

次数	0	1	2	3	4
大循环 1 次	26.9	27.8	29.0	20.8	21.6
大循环 2 次	24.5	23.4	24.3	17.1	17.7
大循环 3 次	22.8	19.8	20.4	14.0	14.5

根据数据绘制柱状图（图 3-5）。

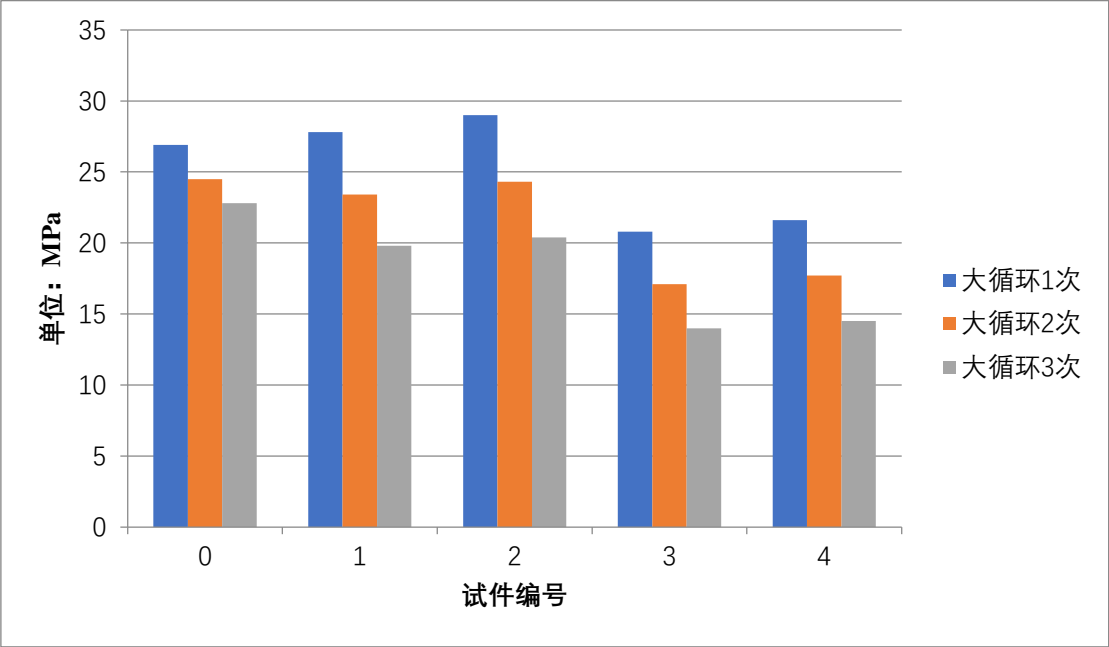


图 3-5 试件碳化和硫酸盐侵蚀下的抗压强度柱状图

通过上图数据可知：

- 1.各号试件的抗压强度都呈现了一定程度的下降；
- 2.与原始配比相比较，其他试件配比的抗压强度下降速率明显要更快一些。

3.4.3 原因分析

试件在经历硫酸盐侵蚀过程中，不断经受干湿循环以及高温烘烤的影响，其表面将会出现干缩裂缝。这些干缩裂缝会让更多的硫酸盐离子进入试件内部孔隙，导致形成较多的钙矾石和石膏晶体。这些大量的晶体会在砂浆孔隙内壁形成拉应力，从而破坏孔隙并形成裂缝，使得砂浆的力学性能降低。由于硫酸盐在干湿循环中会导致干缩裂缝产生，

这些裂缝会促进 CO_2 侵入砂浆内部，与砂浆中的碱性物质如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应，导致砂浆内部结构改变，因此试件强度会下降^[25]。两个方面原因的共同影响促进了试件抗压强度下降的加速。两个方面的原因共同作用，导致试件抗压强度迅速降低。

钢渣中的 Ca_2SiO_4 和 CaO 可以分解为 CaCO_3 ，而 CaCO_3 会与硫酸盐中的硫酸根离子反应生成 CaSO_4 ，这使得掺入钢渣配比试件的抗压强度下降速度明显大于原始配比。

3.5 本章小结

随着养护时间的延长，添加钢渣的混凝土压力强度相对于没有添加钢渣的混凝土快速提升。使用硫酸盐进行侵蚀时，混合了钢渣的配合比具有更快的抗压强度上升和下降速率，相比未混合钢渣的配合比。碳化作用对于掺钢渣配比的抗压强度有促进作用，比起不掺钢渣配比，上升速率更快。掺入钢渣的混凝土在硫酸盐侵蚀和碳化的同时能够保持更快的抗压强度下降速率，相比不掺入钢渣的混凝土。

在碳化和硫酸盐侵蚀的情况下，水泥砂浆的强度受到的影响与二者各自的影响效应不是简单叠加的关系，而是存在相互影响和相互促进的特征。

4 劣化性能分析

4.1 试件在硫酸盐侵蚀作用下的质量损失率

4.1.1 试验过程

分别将在硫酸盐侵蚀干湿循环 10 次、20 次、30 次后的试件取出，然后用手帕擦干试件放在秤上称重，记录数据代入式（4-1）进行计算得出质量损失率。

$$m = \frac{d_0-d_1}{d_0} \times 100\%$$
 (4-1)

式中：*m*-质量损失率，%；

*d*₀-原始质量，g；

*d*₁-侵蚀后的质量，g。

4.1.2 试验数据

各号砂浆试件在硫酸盐侵蚀作用下的质量损失率数据见表 4-1，其中每组试件的数据取自多次试验的平均值，并已去除误差较大的数据。

表 4-1 试件在硫酸盐侵蚀下的质量损失率

试件编号	干湿循环次数		
	10	20	30
0	-0.004	-0.001	0.002
1	-0.011	0.002	0.014
2	-0.013	0.002	0.017
3	-0.014	0.004	0.021
4	-0.015	0.005	0.023

根据数据绘制折线图（图 4-1）。

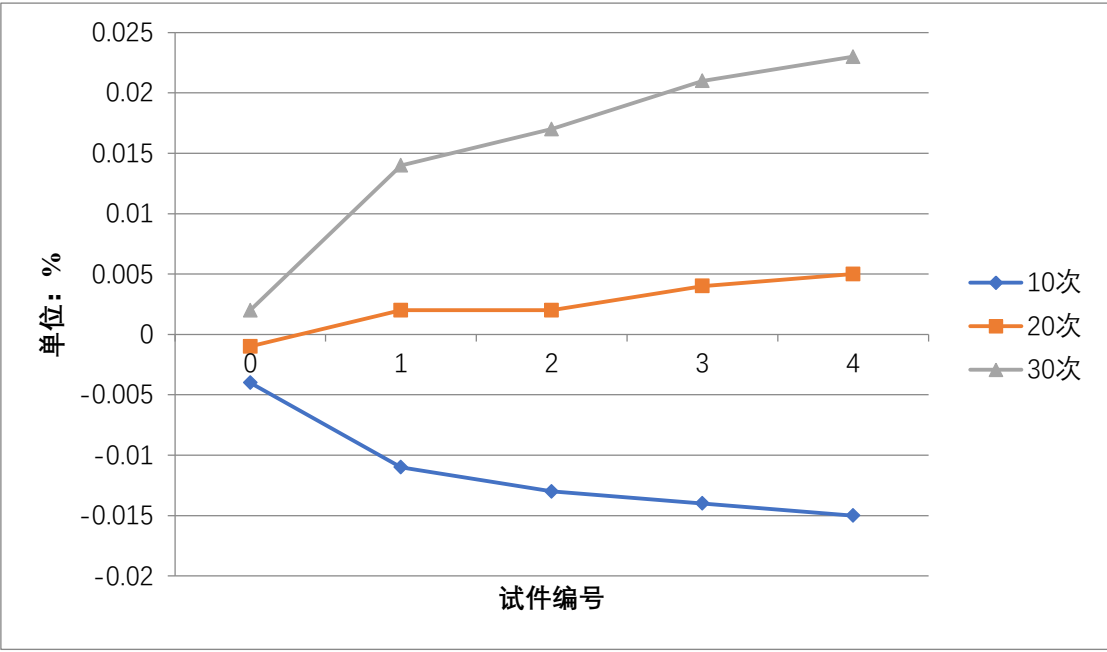


图 4-1 试件在硫酸盐侵蚀下的质量损失率折线图

通过上图数据可知：

- 1.各号试件的质量在硫酸盐侵蚀下都呈现先上升然后开始下降；
- 2.与原始配比相比较，掺钢渣的试件配比的质量上升和下降速率明显要更快一些。

4.1.3 原因分析

钢渣骨料相比原始配比结构更为多孔，因此在干湿循环过程中更容易形成结晶，尤其在刚开始干湿循环时，大量结晶形成导致质量明显增加，而原始配比因为结构较密实，所以刚开始时形成的结晶较少，导致质量增长较慢。

随着干湿循环次数增加，试件表面因侵蚀而部分脱落，试件的重量开始减少，而且钢渣掺量越高，孔隙率就越大，盐结晶造成的破坏就会更加严重^[26]。

4.2 试件在碳化作用下的碳化深度

4.2.1 试验过程

取出碳化时间为 3 天、6 天、9 天的试件，选择一个水平面，用铁锤敲击凿子，在试件上敲出直径约 1.5 厘米、深度约 1 厘米的砂浆孔洞。使用洗耳球将孔洞中的粉末和碎屑吹干净，然后用胶头滴管吸入少量浓度为 1.5% 的酚酞酒精溶液滴入孔洞区，酚酞会在水泥砂浆中的强碱作用下变色，已经碳化的部分不会变色^[27]。最后使用碳化深度测量仪对试件进行测量，测量三次取平均值并记录数据。

4.2.2 试验数据

各号砂浆试件在碳化作用下的碳化深度（单位：mm）数据见表 4-2，其中每组试件的数据取自多次试验的平均值，并已去除误差较大的数据。

表 4-2 试件在碳化下的碳化深度

试件编号	碳化天数		
	3	6	9
0	4.6	5.9	7.8
1	5.3	7.2	8.9
2	5.6	7.7	9.4
3	6.1	8.9	11.1
4	6.3	9.3	11.4

根据数据绘制折线图（图 4-2）。

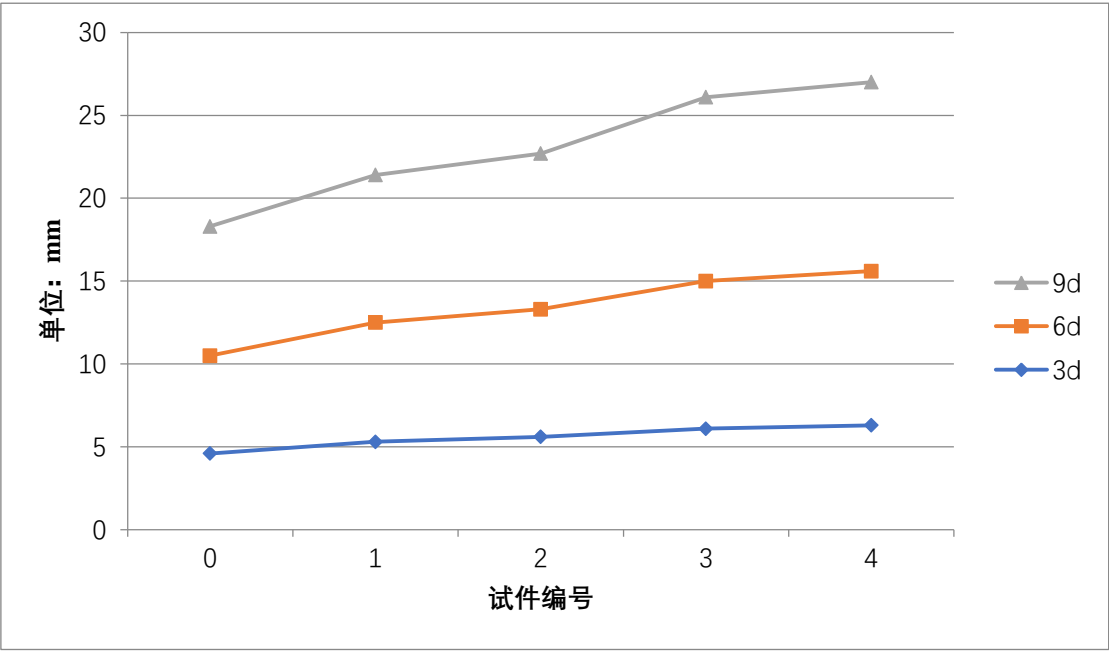


图 4-2 试件在碳化下的碳化深度折线图

通过上图数据可知：

- 1.各号试件配比在碳化作用下的碳化深度都呈现先上升趋势；
- 2.与原始配比相比较，掺钢渣的试件配比的碳化深度要更高一些。

4.2.3 原因分析

钢渣作为掺合料时，其活性低于水泥，配比中钢渣掺量较多的试件其微结构发展较慢，密实程度也较差，这将使 CO_2 更容易渗透到水泥砂浆中。同时，虽然残余钢的水合作用也会产生低于同等质量水泥量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，但会产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 由于钢渣可以替代水泥的数量较多，使得水泥水化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的数量会降低，因此掺入钢渣的配比试件的抗碳化性能会受到影响并变得更差^[27]。

4.3 本章小结

掺钢渣的配比试件在硫酸盐侵蚀下的质量变化相较于原始配比试件要更大，且它们的质量都呈现先上升后下降的趋势。

在碳化作用下的碳化深度随着钢渣取代水泥掺量变多会变得更大，抗碳化能力因此变得更弱。

5 劣化机理分析

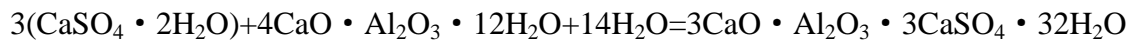
本试验采用 XRD-6100 型 X 射线衍射仪进行试验，试验的样品为水泥砂浆粉末，实验过程需用机器进行扫描分析结果^[28]。

5.1 在硫酸盐侵蚀下的劣化机理分析

砂浆中的硫酸盐侵蚀是一种复杂的物理化学过程，其反应机理异常复杂。总体而言，这种侵蚀主要由两个方面的原因造成。首先，砂浆会吸收大量空气中的水分，从而导致其中的盐类形成结晶水合物。这种情况会引起体积膨胀和内部应力的增长。当内部应力逐渐增长至砂浆的抗拉强度时，就会发生破坏。当侵蚀介质的 PH 值发生变化时，水泥砂浆中的某些组分，如 CH 和 C-S-H，有可能会被溶解或分解，这可能会导致水泥砂浆失去强度和粘结性。因此，在使用水泥砂浆时，要注意侵蚀介质的性质，以避免对其产生损害^[28]。

硫酸盐腐蚀水泥砂浆的特点在于其表面会出现白色现象，破损通常从边角处开始，之后会出现裂缝，这使其成为易碎而脆弱的状态。硫酸盐和水中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 能反应生成硫酸钙，然后硫酸钙再与水泥石中的固态水化铝酸钙反应生成三硫型水化铝酸钙，也就是钙矾石，反应方程式可以表示为：





5.2 在碳化作用下的劣化机理分析

碳化是一种复杂的物理化学变化过程，水泥中碱性物质与大气中的 CO_2 反应生成 CaCO_3 等产物的过程称为碳化。当外界环境中的 CO_2 进入砂浆内部时，它会在气相和液相（毛细孔隙和孔溶液）中扩散，并被水泥水化产物吸收或反应^[29]。水泥中的化学物质，包括水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H，以及未水化的水泥熟料 C_3S 和 C_2S 等，都可以与 CO_2 发生化学反应，因此会造成水泥砂浆碱度的降低。

5.3 本章小结

硫酸盐侵蚀和碳化都是一种复杂的物理化学反应，其中硫酸盐侵蚀对水泥砂浆的抗压强度影响较大，其会使得砂浆的抗压强度得到降低。而碳化对水泥砂浆影响更多的则是碱度的降低，对砂浆的抗压强度影响较小。

总结

本研究测试了双掺钢渣水泥基材料在碳化和硫酸盐侵蚀交替作用下的力学性能和劣化性能。经过实验得出以下结论：

1.掺入钢渣的水泥基材料，在养护过程中其抗压强度上升的速率明显高于未掺入钢渣的水泥基材料；在遭受硫酸盐侵蚀作用下其抗压强度上升和下降的速率明显高于未掺入钢渣的水泥基材料；在碳化作用下其抗压强度上升的速率明显高于未掺入钢渣的水泥基材料；在碳化和硫酸盐侵蚀交替作用下其抗压强度下降的速率明显高于未掺入钢渣的水泥基材料。

2.掺入钢渣的水泥基材料在受到硫酸盐侵蚀时，其质量变化量比原始试件更大。此外，这些试件的质量变化表现出先增加后减少的趋势。

3.随着钢渣取代水泥的掺量增多，碳化深度会进一步增大，进而导致材料的抗碳化能力减弱。

4.掺钢渣的水泥基材料在使用时应尽量避开硫酸盐侵蚀和碳化的环境，当掺钢渣的水泥基材料运用在侵蚀环境较小的情况下其经济效益明显要好于传统的水泥基材料。总而言之，在侵蚀环境较小的情况下试件最佳配合比应该为 4 号配比。

致谢

在本科生毕业论文的写作过程中，我得到了很多人的支持和帮助，让我顺利完成了这篇论文。在此，我要向他们表达我最真挚的谢意和感激之情。

首先，我要感谢我的指导老师刘芳，她在我整个研究过程中给了我无微不至的指导和帮助，对我的论文提出了宝贵的意见和建议，帮助我不断完善我的研究内容，还非常关心我的生活和成长，给予我许多鼓励和帮助。

其次，我要感谢实验室的其他老师和同学们，感谢他们为我的研究提供了帮助和支持，让我顺利地完成了我的实验和调研工作。他们的知识和经验让我受益匪浅，并且在实验中遇到问题时给了我很多帮助，感谢你们！

感谢我的家人和朋友们，你们是我坚实的后盾。你们的陪伴与关爱帮我度过了学生生涯中的挫折和难关。你们的鼓励和支持一直是我前进的动力，再次向你们致以最真挚的感谢！

最后，感谢学校和各级领导的大力支持和关怀，你们的帮助让我能够顺利地完成本科学业。感谢所有的老师和同学们，在他们的帮助和支持下，我相信我会做得更好。感恩每一个与我有过交集的人，感谢你们一路相伴。

参考文献

- [1] Zhihong Pan, Juanlan Zhou, Xin Jiang, et al. Investigating the effects of steel slag powder on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 2019, 200: 570-577.
- [2] Tanvi Gupta, S.N.Sachdeva. Laboratory investigation and modeling of concrete pavements containing AOD steel slag. *Cement and Concrete Research*, 2019, 124:1-11.
- [3] S. Kourounis, S. Tsivilis, P.E. Tsakiridis, et al. Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(6): 815-822.
- [4] Wang Qiang, Yan Peiyu. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(7): 1134-1140.
- [5] 郑武西. 钢渣在水泥稳定碎石基层中的应用研究[D].长安大学,2018.
- [6] 李翔. 低碳双掺钢渣混凝土的试验研究[D].西安建筑科技大学,2013.
- [7] 张澎. 掺钢渣的水泥稳定碎石性能的研究[D].南京林业大学,2005.
- [8] 姚瑞琰. 水泥钢渣粉稳定集料路用性能的研究[D].南京林业大学,2006.
- [9] 吴燕开,李文艳,郭肖阳,马艳慧,苗盛瑶.钢渣粉水泥固化淤泥土氯盐侵蚀下力学性能及机理研究[J].青岛理工大学学报,2023,44(02):23-34.
- [10] 费帆, 廖龙, 欧阳东.钢渣矿渣复合对海工混凝土耐久性影响的试验研究[J].硅酸盐通报, 2016, 35(12): 4133-4139.
- [11] 杜应吉. 地铁工程混凝土耐久性研究与寿命预测[D].河海大学,2005.
- [12] 王宏宇,顾晓薇,张延年,胥孝川,王青.钢渣基多固废掺合料制备水泥砂浆及其力学性能研究[J].金属矿山,2022(01):53-59.DOI:10.19614/j.cnki.jsks.202201007.
- [13] 任益岭,杨超,李好,吴少鹏,谢君.钢渣粉在水泥砂浆中的应用研究[J].建材世界,2018,39(06):25-28.
- [14] 黄俊田. 钢渣微粉水泥砂浆的性能研究[D].武汉轻工大学,2017.
- [15] 方宏辉.钢渣细集料混凝土的配制及性能研究[J].河南建材,2001(01):12-16.

- [16]董双快,吴福飞.工业废渣替代砂浆细集料的可行性研究[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2020,38(02):101-107.DOI:10.16614/j.gznuj.zrb.2020.02.016.
- [17]柴林杰,郇帆,王彦.掺量和长度效应对矿渣纤维加筋水泥砂浆强度的影响[J].长江科学院院报,2023,40(05):178-182.
- [18]李周义.水泥基材料的一维碳化、氯离子和硫酸盐侵蚀的 XCT 结果分析[D].深圳大学,2019.DOI:10.27321/d.cnki.gszdu.2019.000623.
- [19]肖沐.掺钢渣粉 PVA 纤维增强水泥基复合材料力学性能及耐久性研究[D].湖北工业大学,2021.DOI:10.27131/d.cnki.ghugc.2021.000037.
- [20]吴鹏,韦选纯,蔡新华,苏骏,汤盛文.掺钢渣粉高韧性纤维增强水泥基复合材料弯曲性能试验[J].混凝土,2018(07):81-84.
- [21]杜君,刘家祥.石膏与硅灰对钢渣水泥基胶凝材料复合改性效应[J].土木工程,2013,35(03):131-136.
- [22]戴银所,陆春华,倪亚茹,许仲梓.掺钢渣水泥基复合材料的吸波性能[J].硅酸盐学报,2009,37(12):2097-2101.
- [23]陈颖,刘鹏,尹健,贺飒飒,张晓强,余志武.硫酸盐和碳化耦合作用下混凝土劣化机理与耐久性评估研究进展[J].新型建筑材料,2023,50(05):1-7.
- [24]孙阳.考虑碳化及硫酸盐侵蚀影响的面板混凝土强度特性研究[D].西安理工大学,2017.
- [25]李昕.碳化及硫酸盐侵蚀作用对混凝土质量损失的影响分析[J].水利技术监督,2017,25(02):64-67.
- [26]代鑫旖.磷化及硫酸盐侵蚀对水泥砂浆损伤影响研究[D].青岛理工大学,2015.
- [27]刘昂,宫尧尧,高嵩,班顺莉,郭嘉.碳化和纳米 SiO₂ 改性再生粗骨料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能[J].福州大学学报(自然科学版),2023,51(02):256-263.
- [28]邓芳.碳化-硫酸盐-干湿循环下的项目混凝土耐久性实验研究[J].当代化工,2019,48(10):2265-2268.DOI:10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2019.10.022.
- [29]郑佳明,杨鼎宜.干湿交替和碳化对混凝土硫酸盐侵蚀的影响[J].混凝土,2009(05):31-34.